



**António Xavier  
Fernandes Soares**

**Logger Solar com controlo de produção**





**António Xavier  
Fernandes Soares**

## **Logger Solar com controlo de produção**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Paulo Barcelar Reis Pedreiras, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica Telecomunicações e Informática e do Dr. Valter Filipe Miranda Castelão Silva, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda da Universidade de Aveiro



**o júri / the jury**

presidente / president

**Prof. Doutor Alexandre Manuel Moutela da Mota**

Professor associado da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

**Prof. Doutor Paulo Bacelar Reis Pedreiras**

Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Frederico Miguel do Céu Marques dos Santos**

Professor adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra



**agradecimentos /  
acknowledgements**

Agradeço aos meus pais pelo incondicional apoio em todas as lutas que estes anos de academia me trouxeram.

Um agradecimento muito especial ao Flávio pelos inúmeros ensinamentos e experiências que me proporcionou, pelas longas batalhas que me ajudou a vencer ao longo do curso e pelos projetos dos quais orgulhosamente foi colega.

Agradeço aos professores Paulo Pedreiras e Valter Silva toda a orientação e auxílio prestados durante o desenvolvimento do projeto.

Agradeço a todos os amigos e colegas que me ajudaram e acompanharam durante esta etapa da minha vida.

Agradeço em especial à Inês por toda a paciência e apoio ao longo dos anos.

A todos vós muito obrigado!





**palavras-chave**

Energias Renováveis, Logger Solar, Independente de Inversor, microcontrolador, instrumentação.

**resumo**

O uso de fontes renováveis na produção de energia elétrica tem sofrido, nos últimos anos, um aumento significativo em Portugal. Devido ao elevado custo associado à instalação de sistemas de geração de energia fotovoltaica, é necessário recorrer a sistemas de monitorização por forma a garantir um controlo quase constante sobre o funcionamento dos mesmos. Esta monitorização pode permitir não só uma atempada identificação de anomalias que causam quebras significativas na produção, levando a perdas económicas, como também sensibilizar para uma maior eficiência nos hábitos energéticos dos utilizadores. Existe atualmente uma vasta gama de sistemas de monitorização no mercado, que vão desde sistemas simples a soluções bastante elaboradas e complexas. Contudo, dentro dos mais elaborados e robustos, grande parte deles estão dependentes de comunicação com o inversor ou são produzidos por empresas que produzem inversores, empresas estas cujas soluções de monitorização apenas são compatíveis com uma lista estrita de inversores. Como tal, neste projeto pretende desenvolver-se um sistema de monitorização que seja independente de inversor, que apresente baixo custo e possua uma vasta gama de funcionalidades, como monitorização de ambos os lados DC e AC, geração de relatórios para períodos específicos de tempo, emissão de alertas e deteção de anomalias, tudo isto através de uma plataforma WEB que será a interface de comunicação com o utilizador.



**keywords**

renewable energies, solar data logger, inverter independent, microcontroller, instrumentation

**abstract**

The use of renewable sources in the production of electric energy has increasing significantly in Portugal during the last decade. Due to the high cost associated to the photovoltaic systems, it is essential to use a monitoring device to ensure a constant control of the performance of the system. This monitoring should not only allow an early detection of malfunctions which lead to a break of production, causing economical losses, as well to make people more sensitive about their electrical consumption behaviors. There are a lot of monitoring solutions in the market nowadays that go from basic and easy solutions to complex and more complete applications. However, the more complete ones are inverter dependent, or build by inverter manufacturing companies which only ensure monitoring devices compatible with a short list of inverter devices. Trying so to solve the inverter dependency problem, this project aims to develop a monitoring systems, inverter independent, low-cost with a full package of capabilities as AC and DC sides monitoring, report generation for a specific time-frame, alert emitting and malfunction detection, all through a WEB platform which will be the user interface.



# CONTEÚDO

---

CONTEÚDO . . . . .	i
LISTA DE FIGURAS . . . . .	iii
LISTA DE TABELAS . . . . .	v
GLOSSÁRIO . . . . .	vii
1 INTRODUÇÃO . . . . .	1
1.1 Objetivos . . . . .	2
1.2 Organização do documento . . . . .	2
2 ESTADO DA ARTE . . . . .	3
2.1 Sistema de Geração . . . . .	3
2.1.1 Estrutura FV . . . . .	4
2.1.2 Performance . . . . .	6
2.1.3 Mercado . . . . .	6
2.2 Monitorização . . . . .	8
2.2.1 Sistemas dependentes de inversor . . . . .	8
2.2.2 Sistemas independentes de inversor . . . . .	9
2.2.3 Standard IEC 61724:1998 . . . . .	11
2.2.4 Mercado . . . . .	12
2.3 Análise de Detecção de Anomalias . . . . .	13
2.3.1 Regression-Based Linear Modeling . . . . .	13
2.3.2 PVSAT-2 . . . . .	15
2.4 Potência em cargas lineares e não lineares . . . . .	17
2.4.1 Potência em cargas lineares . . . . .	17
2.4.2 Potência em cargas não lineares . . . . .	18
2.5 Sensores de Corrente . . . . .	19
2.5.1 Transformadores de corrente . . . . .	19
2.5.2 Sensores de corrente baseados no Efeito de Hall . . . . .	20
2.6 Sensores de Tensão . . . . .	22
2.6.1 Transformadores . . . . .	22
2.6.2 Divisores Resistivos . . . . .	23
2.6.3 Sensor de efeito de Hall . . . . .	23
2.7 Sensores de Radiação . . . . .	24
2.8 Sumário . . . . .	26

3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA . . . . .	27
3.1	Sensores de circuitos de acondicionamento . . . . .	28
3.1.1	Sensores de Tensão . . . . .	28
3.1.2	Sensores de Corrente . . . . .	32
3.1.3	Sensor de Radiação Solar . . . . .	36
3.2	Processamento e Servidor Web . . . . .	37
3.3	Tensões de Alimentação . . . . .	39
3.4	Firmware . . . . .	42
3.4.1	Aquisição . . . . .	42
3.4.2	Processamento de dados . . . . .	43
3.4.3	Servidor HTTP . . . . .	45
3.4.4	Base de Dados . . . . .	47
3.5	Plataforma WEB . . . . .	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	51
4.1	Hardware . . . . .	51
4.2	Aquisição e Processamento . . . . .	52
4.2.1	Validação dos Cálculos . . . . .	52
4.2.2	Teste de Performance . . . . .	52
4.3	Servidor WEB . . . . .	54
4.3.1	Teste de Comunicação . . . . .	54
4.3.2	Teste Funcionamento . . . . .	55
4.4	Sistema Global . . . . .	55
5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO . . . . .	57
5.1	Trabalho Futuro . . . . .	57
	REFERÊNCIAS . . . . .	59
	ANEXO A: DOCUMENTAÇÃO . . . . .	63
	Introdução . . . . .	63
	Organização Geral do Projeto . . . . .	63
	Configurações . . . . .	63
	Código Principal . . . . .	64
	Importante . . . . .	65
	MOD-ENC624J600 . . . . .	66
	Cartão SD . . . . .	66
	Importante . . . . .	68
	Plataforma WEB e Servidor . . . . .	69
	Importante . . . . .	70
	ANEXO B: ESQUEMAS ELÉTRICOS . . . . .	71

# LISTA DE FIGURAS

---

2.1	Descrição de um <i>array</i> de painéis FV (fonte: [3]) . . . . .	4
2.2	Circuito equivalente de uma célula solar(fonte: [3]) . . . . .	4
2.3	Respostas tensão-corrente e tensão-potência (fonte: [3]) . . . . .	4
2.4	Sistema FV com os componentes principais (fonte: [3]) . . . . .	5
2.5	Diagrama instalação FV ligada a rede (fonte: [3]) . . . . .	5
2.6	Curva de aprendizagem: gráfico do preço do produto em função da experiência (fonte:[16]) . . . . .	7
2.7	Evolução do preço dos painéis fotovoltaicos desde 1980 em função da produção cumulativa (fonte:[16]) . . . . .	7
2.8	Evolução do preço dos inversores a partir dos anos 90 (fonte:[16]) . . . . .	8
2.9	Comparação de sistemas de monitorização existentes no mercado (fonte: [19]–[25] )	10
2.10	Análise de mercado de monitorização FV (fonte:[28]) . . . . .	13
2.11	Relações lineares num sistema FV (fonte:[15]) . . . . .	14
2.12	Variação da performance de um sistema FV ao longo das semanas de crescimento de vegetação (fonte:[15]) . . . . .	15
2.13	Descrição geral de funcionamento do sistema PVSAT-2 (fonte:[31]) . . . . .	16
2.14	Esquema geral do sistema PVSAT-2 (fonte:[31]) . . . . .	16
2.15	Transformador de corrente (fonte:[46]) . . . . .	20
2.16	Princípio do efeito de Hall (fonte:[44]) . . . . .	21
2.17	Ângulo entre condutor e campo magnético no sensor de Hall ( <b>a</b> ); Símbolo elétrico do sensor de Hall ( <b>b</b> ) (fonte:[44]) . . . . .	22
2.18	Esquema de sensor de Hall com saída linear (fonte:[47]) . . . . .	22
2.19	Amostragem da tensão AC com transformador e divisor resistivo (fonte:openenergymonitor.org) . . . . .	23
2.20	EM010 sensor (fonte:[50]) . . . . .	24
2.21	Piranómetro (fonte:[51]) . . . . .	24
2.22	Célula solar de referência (fonte:[51]) . . . . .	25
3.1	Principais módulos do sistema . . . . .	28
3.2	Diagrama de blocos para o circuito de leitura da tensão DC[18] . . . . .	30
3.3	Circuito de leitura da tensão DC[18] . . . . .	30
3.4	Diagrama de blocos do circuito de leitura da tensão AC[18] . . . . .	31
3.5	Circuito para a leitura da tensão AC[18] . . . . .	32
3.6	Diagrama de blocos do circuito de leitura de corrente DC[18] . . . . .	33
3.7	Circuito de leitura da corrente DC[18] . . . . .	35
3.8	Curva de resposta dos sensores da serie CS60 (fonte: [56]) . . . . .	35
3.9	Diagrama de blocos do circuito de corrente AC . . . . .	36

3.10	Circuito elétrico do sensor de corrente AC e respetivo circuito de acondicionamento	36
3.11	Mini painel solar SOL4 Velleman[18]	37
3.12	Circuito do sensor de radiação solar[18]	37
3.13	Pinos de comunicação da DETPIC32 (fonte:Guião das Aulas práticas, ACII 2011)	38
3.14	MOD-ENC624J600 desenvolvido pela Olimex(fonte:OlimexWEBSITE)	38
3.15	Módulo para cartão de memória	39
3.16	Esquema de fontes de alimentação[18]	39
3.17	Diagrama com os requisitos de corrente e tensão[18]	40
3.18	Diagrama de blocos das fontes de alimentação da parte eletrónica[18]	40
3.19	Circuito elétrico das fontes de tensão de 12V, 5V, e 3.3V	41
3.20	Circuito elétrico da fonte de -12V[18]	41
3.21	Fontes de Alimentação para os amplificadores de Isolamento[18]	41
3.22	Circuito das fontes de alimentação 5V para os amplificadores de isolamento[18]	42
3.23	Diagrama do código da rotina de serviço a interrupção	43
3.24	Ilustração de um buffer circular (fonte:luaVIEW)	43
3.25	Diagrama de código do processamento dos dados.	44
3.26	Diagrama temporal do sistema	45
3.27	Diagrama implementação servidor HTTP	46
3.28	Descrição divisão cartão de memória	47
3.29	Ficheiro XML contendo uma das estruturas de dados da plataforma [18]	49
4.1	Resultados teste de comunicação	55
1	Relação entre defines e suas funções de Debug	64
2	Esquema de ligações entre DETPIC32 e MOD-ENC624J600 e legenda dos pinos de ligação do ultimo.	66
3	Bibliotecas e funções de comunicação com o cartão SD via SPI.	67
4	Esquema ligações SD Card e DETPIC32.	67
5	Exemplos implementações rotinas de acesso ao cartão SD.	68
6	Circuito proposto para geração de todas as tensões de referência do circuito	71



# LISTA DE TABELAS

---

2.1	Exemplos de inversores existentes no mercado para várias potências (fontes:[5]–[9])	6
2.2	Tabela de parâmetros a serem monitorizados em tempo real segundo a norma IEC 61724 (fonte:[26]) . . . . .	11
2.3	Lista do erro percentual máximo para cada um dos parâmetros (fonte: [26]) . . .	12
3.1	Lista de amplificadores de isolamento . . . . .	29
3.2	Lista de sensores de corrente . . . . .	33
4.1	Valores sinal entrada e saída do circuito acondicionamento . . . . .	51
4.2	Valores de Erro . . . . .	51
4.3	Resultados e erros AC . . . . .	52
4.4	Resultados e erros DC . . . . .	52
4.5	Tempos de execução do código ( $\mu s$ ) . . . . .	53
4.6	Tempos de execução do código para o pior caso ( $\mu s$ ) . . . . .	54
4.7	Dados escritos no cartão de memória ( $\mu s$ ) . . . . .	55
1	Dimensionamento circuito . . . . .	71



# GLOSSÁRIO

---

<b>AC</b>	Alternating current	<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>ADC</b>	Analogic Digital Converter	<b>MPFS</b>	Microchip File System
<b>DC</b>	Direct Current	<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>DETI-UA</b>	Departamento de Eletrónica Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro	<b>RTC</b>	Real Time Clock
<b>FV</b>	Fotovoltaico	<b>RSI</b>	Rotina de Serviço a Interrupção
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Inter-Integrated Circuit	<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>MPP</b>	Maximum Power Point	<b>XML</b>	eXtensible Markup Language



# INTRODUÇÃO

---

A produção de energia elétrica recorrendo a fontes renováveis tem apresentado um desenvolvimento evidente na última década, como se pode constatar pelo facto de Portugal ter conseguido durante quatro dias do mês de Maio deste ano ser unicamente alimentado pelas mesmas [1]. Este tipo de produção de energia representou cerca de 53.7% do total produzido em 2015 em Portugal [2]. Contudo, apesar da energia Fotovoltaica não ser a que mais contribui para estes valores, ela é de longe que a mais evoluiu na última década tendo em conta a produção anual [2].

Nos sistemas de geração Fotovoltaica, os módulos permitem a produção de energia elétrica a partir de energia solar, sendo que a primeira depois de convertida de DC para AC pode ser consumida ou até mesmo injetada na rede pública [3]. Como o custo de implementação destes sistemas se apresenta elevado, é de extrema importância proceder-se à monitorização dos valores de produção destes mesmos sistemas, para que o utilizador possa detetar precocemente anomalias no sistema e com uma atempada resolução dos mesmos evitar longos períodos de não produção. Existem também vantagens associadas ao consumo de energia, pois os hábitos dos utilizadores dos sistemas de monitorização levam a uma diminuição de cerca de 10% no consumo energético devido à sua sensibilização para com os gastos energéticos [4].

Existem já atualmente diversos sistemas de monitorização no mercado. Alguns são produzidos por empresas independentes e cobrem uma vasta gama, desde níveis muito básicos de monitorização até aplicações profissionais extremamente completas e complexas. Contudo, um rápido estudo ao mercado permite verificar que estes últimos apresentam custos extremamente elevados. Por outro lado, os sistemas menos onerosos e com níveis de funcionalidade interessantes, apenas se podem usar num conjunto limitado de inversores, pois estão dependentes de comunicação com os mesmos para o seu correto funcionamento.

Como tal, a principal motivação deste projeto baseia-se na criação de um sistema de monitorização independente do inversor, capaz de executar todas as tarefas dos sistemas mais completos, a um preço reduzido.

## 1.1 OBJETIVOS

No âmbito desta dissertação pretende-se desenvolver a prova de conceito de um sistema de monitorização que seja independente do fabricante do inversor, procedendo-se como tal ao desenvolvimento de *hardware* e *software* por forma a cumprir os objetivos do sistema.

Este sistema deverá de ser capaz de fazer a monitorização de ambos os lados AC e DC do sistema de geração, produzir resultados dessa mesma monitorização e apresenta-los ao utilizador através de uma plataforma WEB. Esta plataforma deverá possibilitar a emissão de alertas, bem como dados estatísticos de produções diária, mensal e até mesmo anual.

Este projeto, contudo, deverá de ter uma linha de continuidade em relação ao que foi já anteriormente desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado Logger Solar Independente de Inversor. As principais insuficiências do projeto anteriormente referido recaem sobre insuficiência de memória e processamento da placa de desenvolvimento, o que levou a uma incompleta implementação do *software*, bem como problemas referentes a um *offset* variável referente ao circuito da corrente AC.

O trabalho deverá então proceder a uma revisão ao *hardware* já existente e substituição dos circuitos que apresentarem funcionamentos incorretos. A placa de desenvolvimento existente deverá ser substituída por uma nova solução de *hardware* e *software* que seja capaz de produzir dados de monitorização do sistema bem como implementar uma plataforma WEB que permita ao utilizador aceder aos dados de monitorização em qualquer computador ou *smartphone*.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O documento encontra-se organizado nos seguintes capítulos:

**Capítulo 2:** Neste capítulo é analisado o estado atual da tecnologia dos sistemas de monitorização FV. Nele são introduzidos os conceitos mais importantes relativamente a um sistema de geração de energia solar, sistemas de monitorização e análise de mercado dos mesmos. É ainda abordada a temática dos sistemas independentes de inversor com a análise dos seus sensores mais comuns bem como fundamentos matemáticos relevantes.

**Capítulo 3:** Todo o sistema é apresentado neste capítulo. Desde a descrição do processo de dimensionamento do *hardware*, bem como a escolha de componentes importantes do mesmo. O *software* desenvolvido é também aqui apresentado e o seu funcionamento descrito de uma forma sumária.

**Capítulo 4:** Neste capítulo são apresentados os resultados de todos os testes efetuados ao sistema. Desde testes a blocos individuais até a testes de sistema completo. São apresentados os procedimentos dos testes realizados, a sua utilidade bem como a discussão dos resultados obtidos.

**Capítulo 5:** No capítulo relativo às conclusões apresentam-se os objetivos atingidos bem como aqueles que não se concluíram. Apresentam-se ainda sugestões para resolução de alguns problemas não resolvidos bem como de futuro trabalho a acrescentar ao projeto

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DA ARTE

---

Apresentando-se como dispositivos de monitorização de sistemas FV, os *loggers solares* têm uma grande importância, pois funcionando como uma ferramenta de *feedback* servem tanto para a detecção de anomalias no sistema FV como para a geração de dados estatísticos sobre a energia produzida pelo mesmo ao longo do tempo. Este capítulo aborda algumas das tecnologias existentes para os sistemas de monitorização tal como os principais módulos do sistema que estamos a monitorizar.

### 2.1 SISTEMA DE GERAÇÃO

Os sistemas de geração FV apresentam-se como uma fonte de energia renovável e, tal como outras tecnologias de energias verdes, ajuda a reduzir o efeito de estufa e a emissão de gases para o ambiente. Podem também ser usados para produzir energia elétrica em locais remotos onde não existe rede elétrica. Todavia estes sistemas apresentam 3 grandes desvantagens. A primeira é que mesmo com o aumento da eficiência deste tipo de sistemas observado nos últimos anos, os seus custos de aquisição e instalação continua considerável. A segunda é que apesar de toda a evolução em torno desta tecnologia, fruto também das crescente popularidade das energia FV entre as energias renováveis, a eficiência dos sistemas continua bastante reduzida, sendo que mais de 95 % das células solares possuem uma eficiência na casa dos 17 % [3]. A terceira está diretamente ligada à natureza da energia gerada, que é DC, enquanto a grande parte das aplicações em que se usam sistemas FV requer AC, o que obriga uma maior complexidade do sistema por forma a converter a energia produzida.

Produzindo energia elétrica a partir da luz solar neles incidentes, os painéis solares são compostos por um conjunto de módulos, módulos estes que por sua vez são compostos por células FV. Um conjunto de painéis forma um *array*, tal como representa a figura 2.1.

Os *arrays* de painéis podem ser organizados de diferentes formas, de modo a que apresentem uma determinada corrente e/ou tensão conforme as necessidades do sistemas em que estão a ser aplicados.

Uma célula FV pode ser modelada pelo circuito simplificado da figura 2.2 o qual é constituído por uma fonte de corrente, um díodo e uma resistência parasita. A corrente gerada na fonte depende da intensidade de luz incidente na célula.

Através do gráfico da figura 2.3, que relaciona a tensão e corrente de uma célula FV, podemos determinar o ponto em que a potência é máxima, o *Maximum Power Point* ou MPP. Por forma

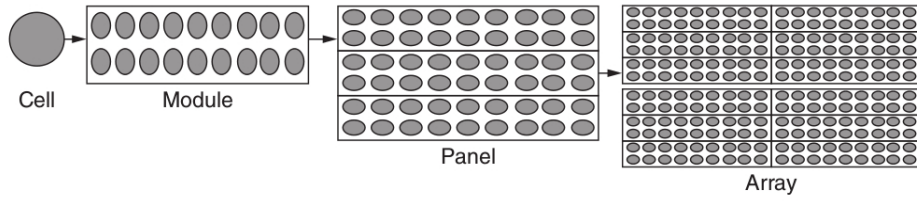


Figura 2.1: Descrição de um *array* de painéis FV (fonte: [3])

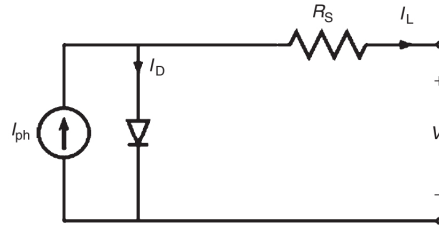


Figura 2.2: Circuito equivalente de uma célula solar (fonte: [3])

a garantir que a potência transferida é a máxima possível, os sistemas FV são equipados com um mecanismo de *Maximum Power Point Tracking*, ou MPPT, por forma a garantir que os seus módulos operam sempre no MPP.

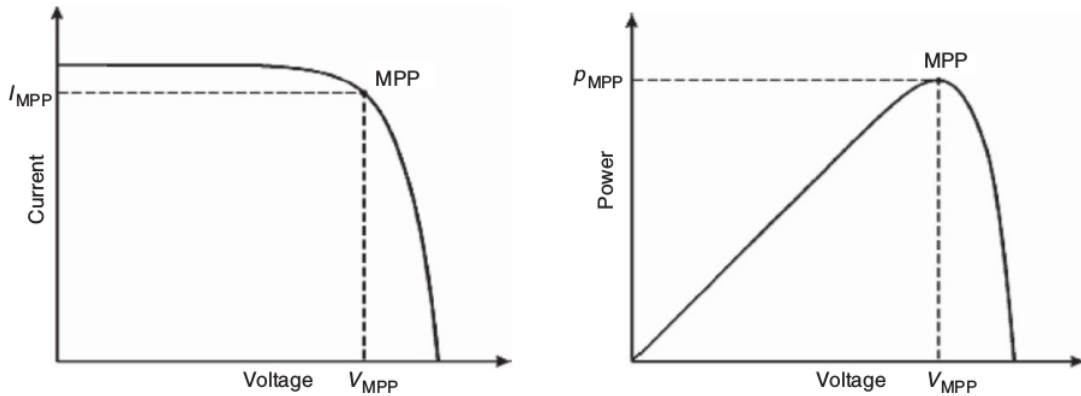


Figura 2.3: Respostas tensão-corrente e tensão-potência (fonte: [3])

### 2.1.1 ESTRUTURA FV

Depois de ser garantido o eficiente funcionamento dos módulos FV, é preciso ainda acrescentar componentes ao sistema já existente para que este opere da melhor forma. Componentes estes que têm de garantir o controlo, conversão, armazenamento e distribuição da energia produzida.

A figura 2.4 apresenta o diagrama de um sistema FV contendo os seus componentes principais.

As instalações destes sistemas podem assentar em três configurações distintas: sistemas de geração autónomos, híbridos e ligados à rede elétrica. Como não é desejável que exista uma relação temporal direta entre a energia produzida e a consumida, é necessária a utilização de acumuladores e reguladores



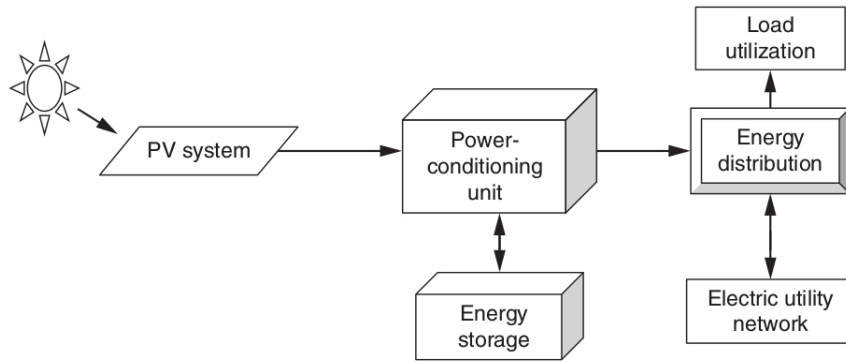


Figura 2.4: Sistema FV com os componentes principais (fonte: [3])

de carga, caso contrário teríamos que limitar a produção de energia à que se consome no momento da produção da mesma.

A figura 2.5 apresenta o diagrama de um sistema cuja instalação está ligada à rede, onde podemos ver já com maior detalhe como é composta a unidade de acondicionamento, onde podemos encontrar o MPPT para garantir o máximo de potência, e o inversor para efetuar a conversão de energia DC para AC.

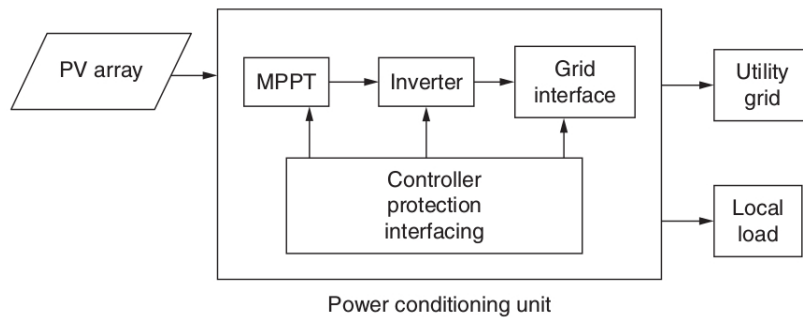


Figura 2.5: Diagrama instalação FV ligada a rede (fonte: [3])

Representado na figura 2.5, o inversor é uma parte constituinte fundamental dos sistemas de geração FV pois este colmata uma das grandes desvantagens dos mesmo que é a da produção de energia DC. Estes apresentam um custo relativamente elevado e admitem tensões e correntes de entrada diferentes para diferentes modelos.

Nas tabelas 2.1 e ?? são apresentados alguns dos modelos disponíveis no mercado e as suas características.

		Potência DC máx.	Tensão DC máx.	Corrente DC máx.	Potência AC nom.	Tensão AC nom.	Corrente AC nom. máx.
Sunny Bot 240		245 W	45 V	8.5 A	230 VA	230 V	1 A
KACO 250		-	45V	9A	250 VA	19-37V	13.2A
Sunny Boy 3000TL		3200W	750V	2 x 15 A	3000VA	180-280V	16 A
ABB PVI 4.2TL		4375W	600V	2 x 16A	4200VA	180-280V	20A
KACO 5.0TL3		5200W	950V	2 x 11A	5000VA	Adaptável	3 x 7.25A
ABB PVI 6000TL		6200W	600V	2 x 18A	6000VA	160-280V	30A
Sunny Tripower 10000TL		10200W	1000V	2 x 22A	10000VA	180-280V	16A
KACO Powador 14.0TL3		12800W	950V	2 x 18.6A	12500VA	Adaptável	3 x 18.1A
Sunny Tripower 25000TL		25550W	1000V	2 x 33A	25000VA	160-280V	36.2A
KACO Powador 60.0TL3		6000W	1000V	3 x 36A	49900VA	Adaptável	72.2A

Tabela 2.1: Exemplos de inversores existentes no mercado para várias potências (fontes:[5]–[9])

### 2.1.2 PERFORMANCE

A performance de um sistema FV depende de vários fatores, entre eles a localização geográfica, o clima e diversos mecanismos que podem conduzir a perdas. As perdas totais de uma instalação podem ser divididas entre perdas por captura ( $L_c$ ) e perdas do sistema ( $L_s$ ). As perdas por captura podem acontecer através da atenuação da luz incidente nos painéis e pela dependência entre a temperatura das células solares e a sua eficiência. As perdas do sistema estão associadas às perdas nas cablagens, a perdas existentes no inversor, a um MPPT defeituoso e a perdas nas conversões nos transformadores que poderão existir [15].

As principais razões que levam a perdas no sistema são a diminuição da performance das células solares devido à temperatura, a presença de sujidade nos painéis que causa atenuação na luz solar incidente, a utilização de um MPPT desajustado e as perdas na cablagem da instalação [15].

### 2.1.3 MERCADO

A tecnologia FV apresenta-se hoje já como sendo uma tecnologia *low-cost* de energia renovável, sendo que se deve tornar rapidamente na mais barata forma de produção de energia elétrica em várias regiões do mundo[16]. Com o preço dos painéis FV a decrescer desde os anos 80, existem estudos que se baseiam no efeito de aprendizagem para caracterizarem a evolução desta tecnologia[16].

Sendo inicialmente introduzido como um modelo matemático para o estudo dos custos de produção na área da aviação, este mesmo modelo introduzido por Theodore Wright em 1936 permite relacionar a produção cumulativa de um dado equipamento com os de produção do mesmo por meio de um modelo linear em escala logarítmica. A equação 2.1 permite fazer a aproximação linear descrita. Nesta equação os valores da abcissa são os da soma cumulativa de produção, enquanto que os da ordenada são o preço de produção de uma unidade do equipamento para um período correspondente. O parâmetro de

aprendizagem  $b$  é utilizado no cálculo da taxa de aprendizagem ( $LR$ ) e do rácio de progressão ( $PR$ ) que são dados na equação 2.2. A figura 2.6 apresenta-nos diversas curvas obtidas com o modelo acima descrito para variadas taxas de aprendizagem. A taxa de aprendizagem é neste caso apresentada como o fator preço experiência.

$$C(x_t) = C(x_0) \left( \frac{x_t}{x_0} \right)^{-b} \quad (2.1)$$

$$LR = 1 - 2^b = 1 - PR \quad (2.2)$$

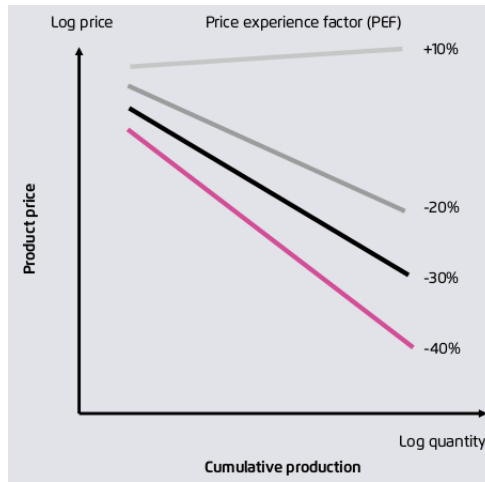


Figura 2.6: Curva de aprendizagem: gráfico do preço do produto em função da experiência (fonte:[16])

Utilizando o método anteriormente descrito, num estudo levado a cabo pela *Agora Energiewend* em conjunto com o *Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems*, sugere-se que a taxa de aprendizagem representada no gráfico 2.7 se mantenha a longo prazo com um valor para a taxa média de aprendizagem de 20.9%. Sugere-se assim a diminuição contínua do preço dos módulos FV[16].

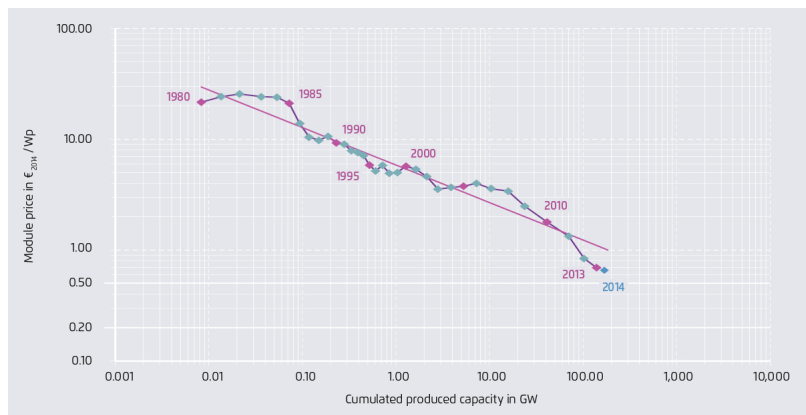


Figura 2.7: Evolução do preço dos painéis fotovoltaicos desde 1980 em função da produção cumulativa (fonte:[16])

A tecnologia associada aos inversores tem também sofrido grandes progressos nas últimas décadas. Como tal, estes dispositivos viram a sua eficiência atingir um aumento muito significativo. Este mesmo aumento levou a uma baixa considerável nos seus custos de produção. A figura 2.8 apresenta-nos a

curva de aprendizagem relativo ao preço de mercado dos inversores, podendo-se observar uma taxa continua de aprendizagem de 18.9%[16].

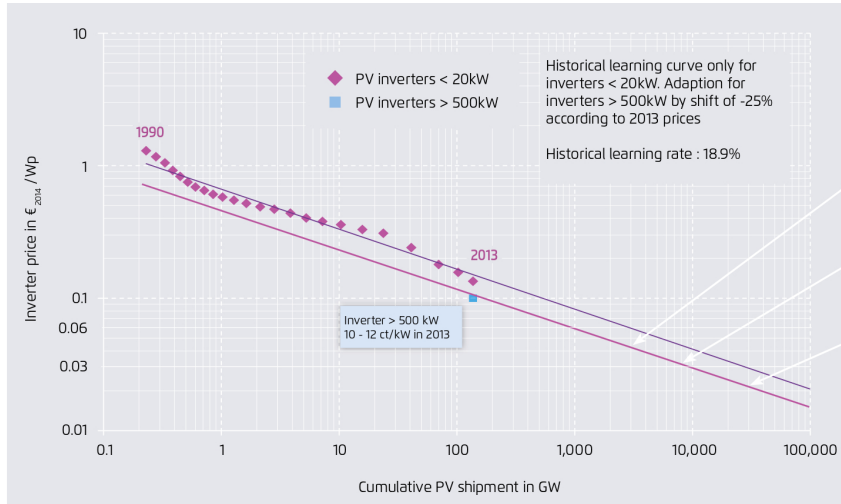


Figura 2.8: Evolução do preço dos inversores a partir dos anos 90 (fonte:[16])

Em resumo, a análise da evolução dos preços de mercados dos dois componentes mais dispendiosos num sistema de geração FV, levam a acreditar que o custo destes últimos continue a baixar no próximos anos[16].

## 2.2 MONITORIZAÇÃO

Nas ultimas duas décadas, a relação entre a prestação real e a teórica de um sistema FV cresceu de 65% para cerca de 85%[15]. Este valor, denominado de *performance ratio*, é o principal indicativo da qualidade de um sistema pois relaciona o *output* teórico de um sistema FV com o seu *output* real.

Esta evolução deve-se em grande parte à aquisição e análise dos dados de variados sistemas de geração FV, o que levou à identificação de lacunas nos sistemas e a melhoramento dos mesmos[15].

Um *logger solar* é, de um modo resumido, um equipamento, composto por *hardware e software*, que tem por objetivo a obtenção de dados relativos à produção energética de um sistema, à sua performance e até à identificação de anomalias no mesmo. Uma atempada deteção de anomalias no sistema pode evitar uma quebra de produção acentuada e prolongada, o que previne perdas económicas consideráveis[17].

Os sistemas atualmente existentes no mercado já possuem capacidade de deteção de falhas, análise de performance e criação de históricos, tal como de fazer estimativas de ganhos financeiros. Contudo, apenas os dispositivos mais caros disponibilizam esta análise completa e consistente pois, os mais baratos não possuem sequer análise da performance em ambos os lados AC e DC do sistema.

### 2.2.1 SISTEMAS DEPENDENTES DE INVERSOR

Sistemas de monitorização dependentes de inversor são aqueles em que dependem obrigatoriamente de uma comunicação direta com o último para o seu correto funcionamento. Estes apresentam a

enorme desvantagem de não serem desagregáveis do mesmo. Ou seja, no caso de mau funcionamento de algum módulo ou componente do sistema de monitorização, como este está dependente do inversor, obriga à substituição não só do sistema de monitorização como também do inversor, o que se torna numa solução consideravelmente dispendiosa.

## 2.2.2 SISTEMAS INDEPENDENTES DE INVERSOR

Sistemas de monitorização independentes de inversor são aqueles que possuem capacidade de executar todas as suas tarefas sem qualquer comunicação com o inversor, ou seja, dependem apenas da *hardware* próprio para aquisição de dados e processamento dos mesmos.

Estes sistemas possuem a vantagem de poder ser instalados em qualquer sistema, independentemente do inversor existente, podendo ser substituídos e/ou retirados sem afetar o normal funcionamento do sistema de geração. Podem também ser instalados em sistemas de geração mais antigos cujos sistemas de motorização não existam.

No âmbito do trabalho realizado no ano anterior [18], foi efetuado um levantamento de soluções de monitorização independentes do inversor existentes no mercado, o qual se encontra sumariado na figura 2.9. Estão aqui presentes apenas *loggers* desenvolvidos por empresas independentes. Podemos verificar que existem no mercados soluções de relativamente baixo custo, como o caso do *Intuition-pv*, em que o custo está na casa dos 100 euros. Contudo as suas valências e capacidades são muito reduzias pois apenas disponibiliza uma monitorização simples da potência gerada do lado AC do sistema FV. Existem, contudo, *loggers* muito mais completos, capazes de fazer a identificação de anomalias e alertar o operador das mesmas. Para tal medem os valores de potência tanto do lado AC como DC do sistema. São exemplos deste tipo de sistemas de monitorização aqueles produzidos pelas empresas *Solar Log* e *Caresolar*[19]–[25].

Dentro das soluções apresentadas existem ainda os *loggers* que, apesar de serem desenvolvidos por empresas independentes continuam a necessitar de comunicação com o inversor do sistema a monitorizar. Estes apresentam, contudo, a particularidade de serem compatíveis com uma vasta gama de inversores. As soluções apresentadas pela empresa *Solar Log* são um destes casos, apesar de que a mesma disponibiliza também a possibilidade de se adquirirem contadores elétricos extra para colmatar alguma ausência de compatibilidade que exista no mercado[25].

Product Comparison									
	PV-3	Care Solar S	Watson Solar Plus	Chorus PV	Solar Log 300 WIFI	Solar Log 2000	Intuition-pv	OpenEnergyMonitor (Open-source)	
Company	Ackeen (UK)	Care Solar (GER)	Energeno (UK)	Green Energy Options (UK)	Solare Datensysteme (GER)	Solare Datensysteme (GER)	The OWL (UK)		
Main Interfaces	Irradiance and CT sensor input Voltage lead input Common Ground	Hall sensors inputs RS232 SO inputs	CT sensors inputs	LED reader and CT sensors inputs	SO-In SO-Out RS485/RS422	RS485, RS422 CAN SO-In SO-Out	CT inputs	AC-AC Voltage adaptor input CT current sensors inputs	
General Info									
Data Upload									
Max. Plant Size (kWp)	-	30	-	24	15	2000	-	-	-
Price	1250€	824€	180€	215€	554€	994€	100€	252€	
Monitoring									
Inverter-Independent	●	●	●	●	○	○	●	●	●
DC Monitoring	●	●	●	●	●	●	●	●	●
AC Monitoring	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Solar Irradiance Sensor	●	○	○	○	●	●	○	○	○
Temperature Sensor	○	○	○	○	●	●	○	●	●
Wind Sensor	○	○	○	○	●	●	○	○	○
Real Time Data	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Power History	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Yield History	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Wireless display	○	○	○	●	●	●	○	●	●
Remote Appliance Switch	○	○	●	○	○	●	○	○	○
Power									
Apparent Power	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Real Power	●	○	○	○	○	○	○	●	●
Reactive Power	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Software									
Local PC Software	●	○	●	○	○	○	○	○	○
Online Monitoring Software	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Smartphone App	○	●	○	●	●	●	●	●	●
Software Alerts	○	●	○	●	●	●	○	●	●
Email Alerts	○	●	○	○	●	●	○	○	○
SMS Alerts	○	●	○	○	●	●	○	○	○
PV Failure Alert	○	●	○	○	●	●	○	○	○
Anti-Theft Alarm	○	○	○	○	○	●	○	○	○
Alerts									

Figura 2.9: Comparação de sistemas de monitorização existentes no mercado (fonte: [19]–[25] )

### 2.2.3 STANDARD IEC 61724:1998

O *standard* IEC 61724 [26] define os principais requisitos de monitorização de um sistema FV. O estabelecimento destas normas teve como objetivo permitir a comparação de diversas estruturas de produção com características diferentes em locais com climas diferentes. Desta forma é possível uma comparação mais correta o que permite destacar as melhores configurações e modos de operação.

O *standard* aponta os procedimentos e cuidados a ter em conta na monitorização de sistemas FV. Devem de ser abordados diversos pontos tais como a radiação ao nível do plano dos painéis FV, a potência à saída do *array* FV, o *input* e *output* dos acumuladores de carga, tensão e corrente entregues à rede, entre outros.

A tabela 2.2 lista os parâmetros a ser monitorizados em tempo real. Estes estão organizados nas categorias de meteorologia, *array* FV, energia de armazenamento, carga, rede de distribuição e fontes de energia alternativas. Os dados a monitorizar, apresentados na tabela 2.2, estão condicionados também ao tipo de sistema de geração, dependendo dos elementos que podem ou não ser monitorizados.

Por último, a tabela 2.3 apresenta as taxas de erros máximas permitidas para cada tipo de parâmetro que se está a monitorizar.

Parameter	Symbol	Unit
Meteorology		
Total irradiance, in the plane of the array <sup>a</sup>	$G_I$	$\text{W m}^{-2}$
Ambient air temperature in a radiation shield	$T_{\text{am}}$	$^{\circ}\text{C}$
Wind speed <sup>b</sup>	$S_W$	$\text{m s}^{-1}$
Photovoltaic array		
Output voltage	$V_A$	V
Output current	$I_A$	A
Output power	$P_A$	kW
Module temperature	$T_m$	$^{\circ}\text{C}$
Tracker tilt angle <sup>e</sup>	$\phi_T$	degrees
Tracker azimuth angle <sup>e</sup>	$\phi_A$	degrees
Energy storage <sup>c</sup>		
Operating voltage	$V_S$	V
Current to storage <sup>d</sup>	$I_{TS}$	A
Current from storage <sup>d</sup>	$I_{FS}$	A
Power to storage <sup>d</sup>	$P_{TS}$	kW
Power from storage <sup>d</sup>	$P_{FS}$	kW
Load <sup>c</sup>		
Load voltage	$V_L$	V
Load current	$I_L$	A
Load power <sup>f</sup>	$P_L$	kW
Utility grid <sup>c</sup>		
Utility voltage	$V_U$	V
Current to utility grid <sup>d</sup>	$I_{TU}$	A
Current from utility grid <sup>d</sup>	$I_{FU}$	A
Power to utility grid <sup>d, f</sup>	$P_{TU}$	kW
Power from utility grid <sup>d, f</sup>	$P_{FU}$	kW
Back-up sources <sup>c</sup>		
Output voltage	$V_{BU}$	V
Output current	$I_{BU}$	A
Output power	$P_{BU}$	kW

Tabela 2.2: Tabela de parâmetros a serem monitorizados em tempo real segundo a norma IEC 61724 (fonte:[26])

O *standard* define também regras para o *sampling* de dados, sendo que para tal deve de ser usado um sistema automático. Para dados que sejam sensíveis à variação da radiação solar, a aquisição deve de ser feita num período máximo de 1 minuto. Contudo, para dados com constantes de tempo superiores,

Parâmetro	Observações	Erro
Radiação Solar	A medição da radiação deve ser realizada utilizando piranômetros ou células de referência devidamente calibradas. A sua instalação deve ser feita no mesmo plano dos painéis.	< 5%
Temperatura Ambiente	A temperatura ambiente deve ser realizada no mesmo local da infraestrutura.	< 1K
Vento	Quando aplicável, a velocidade do vento deve ser medida num sitio alto e localizado na mesma zona da instalação.	< 10%
Temperatura dos Módulos	O sensor deverá ser colocado na superfície interior de um dos módulos.	< 1K
Tensão e Corrente	A tensão e corrente pode ser AC e/ou DC.	< 1%
Potência Eletrifica	A potência elétrica pode ser AC e/ou DC.	< 2%

Tabela 2.3: Lista do erro percentual máximo para cada um dos parâmetros (fonte: [26])

deve usar-se um tempo de aquisição entre 1 e 10 minutos. Para processar os dados adquiridos deve usar-se uma média móvel com períodos múltiplos de 1 hora[26]. No mesmo documento podem ainda encontrar-se formulas para o cálculo do balanço energético e performance do sistema, entre outras.

## 2.2.4 MERCADO

Nos últimos anos houve uma quase explosão virtual de empresas a oferecer serviços de monitorização, levando a um grande aumento de competitividade do setor. Tal explosão deve-se em parte à grande variedade de padrões utilizados na construção de inversores, o que leva uma necessidade de uma grande diversidade de empresas a produzir soluções para todos eles. Um estudo realizado pela *GTMResearch* afirma que empresas como *meteocontrol*, *Solar Log*, *Skytron Energy* estão dentro das maiores da Europa do ramo[27].

A figura 2.10 representa a quantidade energia monitorizada por três tipos distintos de empresas: empresas fabricantes de inversores, empresas independentes e empresas fornecedoras de energia elétrica. É possível verificar que de todas, a empresa SMA é a que mais giga-watts monitorizava em 31/12/2013 sendo que esta é uma empresa fabricante de inversores. Contudo é também bastante evidente pela análise da figura 2.10 o forte crescimento das três maiores empresas independentes, pois estas são as que apresentam mais giga-watts adicionados no ano de 2013. É também claro o domínio do mercado por parte das empresas independentes, pois elas estão em maioria na quantidade de empresas do universo em estudo e representam a maioria dos giga-watts monitorizados dentro do universo representado pela figura.

Um sistema de monitorização representa em média 2% do investimento total numa estrutura de produção FV, embora este valor possa ser um pouco superior para sistemas residenciais. Este preço encontra-se contudo muito dependente das funcionalidades e capacidades que o sistema de monitorização possa ou não apresentar[27]. Pela análise da figura 2.9, podemos verificar que os aparelhos existentes no mercado possuem um leque de capacidades muito extenso e diverso, tal como se apresenta o seu custo. Existem aparelhos capazes de fazer medições energéticas com maior rigor que outros, aparelhos com maior capacidade de armazenamento de dados estatísticos que outros. Existem também em alguns casos, equipamentos que possuem sensores capazes de medir dados complementares por forma a permitirem a identificação de anomalias no sistema de geração, dados estes como a temperatura, vento ou até mesmo radiação solar. Por último existem também variadas formas de disponibilizar a informação para o utilizador, via WIFI, *ethernet*, rede móvel entre outros.

No que ao preço diz respeito, é visível a existência de um conjunto de equipamentos de menor custo,



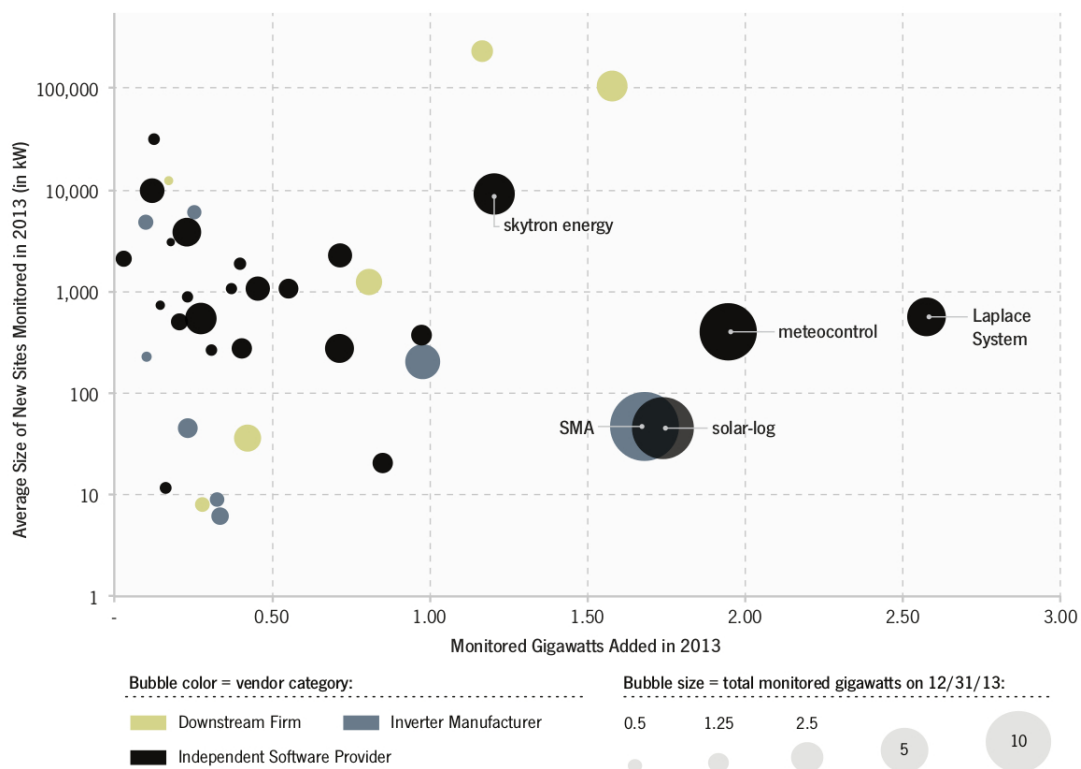


Figura 2.10: Análise de mercado de monitorização FV (fonte:[28])

cujas valências e capacidades são também mais limitadas. Por outro lado é também possível identificar um conjunto de equipamentos mais completos, com custos bastante superiores, que se direcionam para soluções profissionais que exigem um maior rigor e maior capacidade de deteção de anomalias. Nestas soluções de maior dimensão, o custo de aquisição de um sistema de monitorização completo e complexo, é consideravelmente inferior aos prejuízos de produção passíveis de acontecer case se opte por um sistema de monitorização ineficiente para deteção de anomalias.

## 2.3 ANÁLISE DE DETEÇÃO DE ANOMALIAS

Nesta secção são apresentados métodos de análise usados nos sistemas de monitorização FV. A utilização dos mesmos com base nos dados recolhidos pelo sistema permite determinar o desempenho do sistema de geração e por sua vez identificar anomalias no mesmo. São aqui apresentados os métodos *Regression-Based Linear Modeling* e PVSAT-2.

### 2.3.1 REGRESSION-BASED LINEAR MODELING

Desenvolvido pela IEA PVPS, este método faz uma vigia sobre a performance do sistema e identifica anomalias com base na análise de modelos lineares estabelecidos a partir dos principais parâmetros do sistema de geração. A figura 2.11 apresenta todas as 6 relações entre parâmetros possíveis de explorar com este método. Cada uma delas permite a identificação de diferentes anomalias.

Analisámos de seguida uma dessas relações.

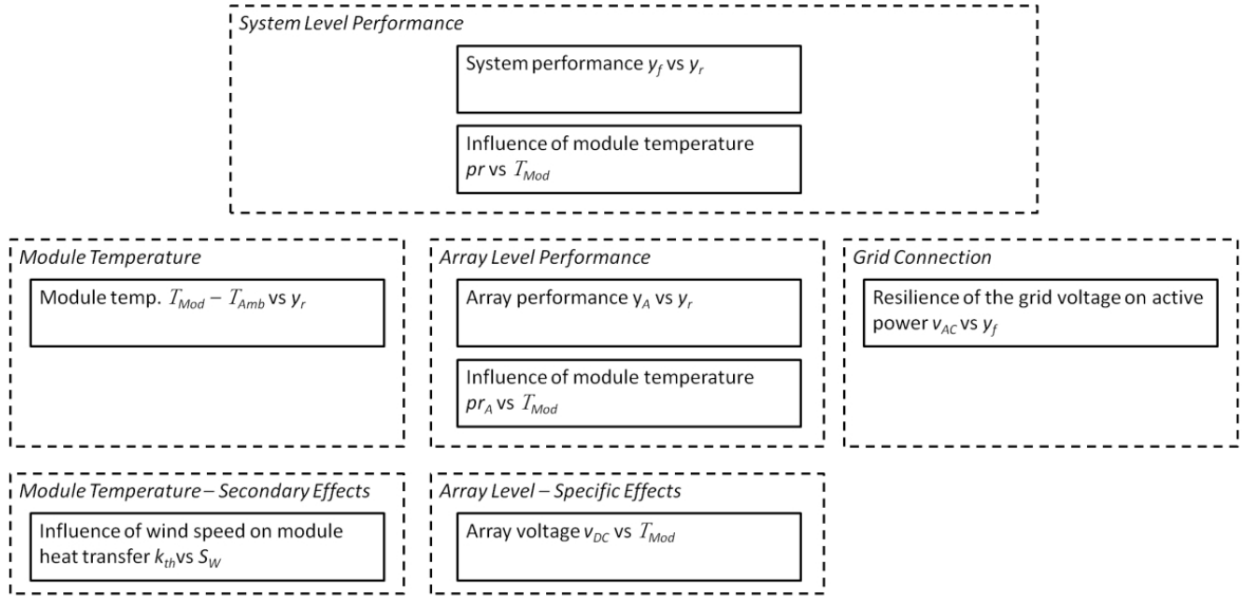


Figura 2.11: Relações lineares num sistema FV (fonte:[15])

A análise da performance do sistema é feita através da linearização de dados relativos à performance total  $y_f$  e à performance de referência  $y_r$ , sendo que esta última é calculada com base na radiação medida num módulo de referência. O gráfico da figura 2.12 apresenta as retas de linearização obtidas com base numa experiência que pretendia estudar o impacto do crescimento da vegetação em volta dos painéis na performance dos mesmos, observando-se o crescimento da vegetação ao longo de 4 semanas. É possível verificar na figura que com o passar das semanas o crescimento da vegetação faz diminuir o declive das retas de linearização, ou seja, com o passar das semanas o crescimento da vegetação leva a um afastamento entre os valores de performance reais e os do modelo. Seria possível então com base no declive das retas de linearização detetar anomalias de performance dos módulos FV[15].

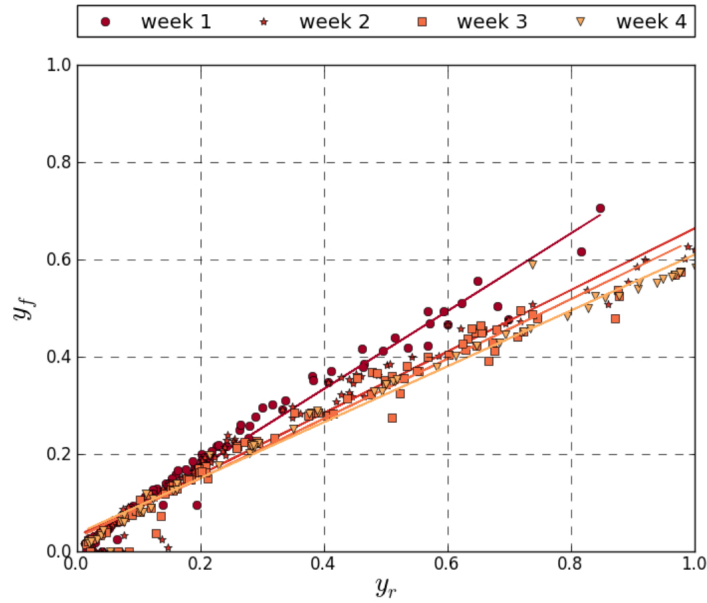


Figura 2.12: Variação da performance de um sistema FV ao longo das semanas de crescimento de vegetação (fonte:[15])

### 2.3.2 PVSAT-2

Este método tem como objetivo a identificação de anomalias num sistema de geração FV através da comparação da potência AC medida à saída do sistema com a potência AC teórica calculada com base num modelo de simulação[29] que envolve a radiação solar e um conjunto específico de características do sistema a monitorizar. Este método não só permite a deteção de anomalias como indica também qual a sua causa mais provável.

Neste procedimento, os dados da radiação solar são obtidos via satélite, neste caso o Meteosat-8, usando o método *Heliosat*, o qual relaciona os dados da radiação global (G) com a radiação de difusão (d) para calcular a potência teórica. Desta forma não é necessário a adição de sensores de captação da radiação solar em cada uma das instalações FV a monitorizar. A radiação de difusão é obtida a partir da radiação global usando um procedimento desenvolvido por Skartveit et al.[30]. Este procedimento permite obter as radiações direta e de difusão a partir da radiação global. As características do sistema relevantes para o modelo do sistema são a localização geográfica da instalação, o tipo de instalação (telhado ou terreno), orientação e inclinação da mesma e as características técnicas dos elementos constituintes do sistema a monitorizar[31].

Na figura 2.14 temos, de uma forma geral, representado o funcionamento deste método. No início o sistema é configurado com todas as características necessárias relativamente a instalação FV. São depois enviados via linha telefónica para a central os dados de potência AC obtidos pelo *logger solar*. Segue-se depois a análise dos mesmos em função dos dados simulados nas funções de deteção de anomalias. Caso se identifiquem falhas segue-se para o envio de mensagem de alerta para o operador[31].

Neste método, o cálculo da potência AC esperada apresenta-se como um processo fulcral, estando a sua precisão e qualidade diretamente associados com a fiabilidade e capacidade de deteção de falhas do método. Como a precisão da medição da radiação através do satélite está fortemente relacionada com o ângulo de elevação do sol e das condições climáticas, é necessário a utilização de um mecanismo de correção dos valores de radiação que são obtidos via satélite. O método de correção usado para o efeito é o "kriging-of-differences"[29].

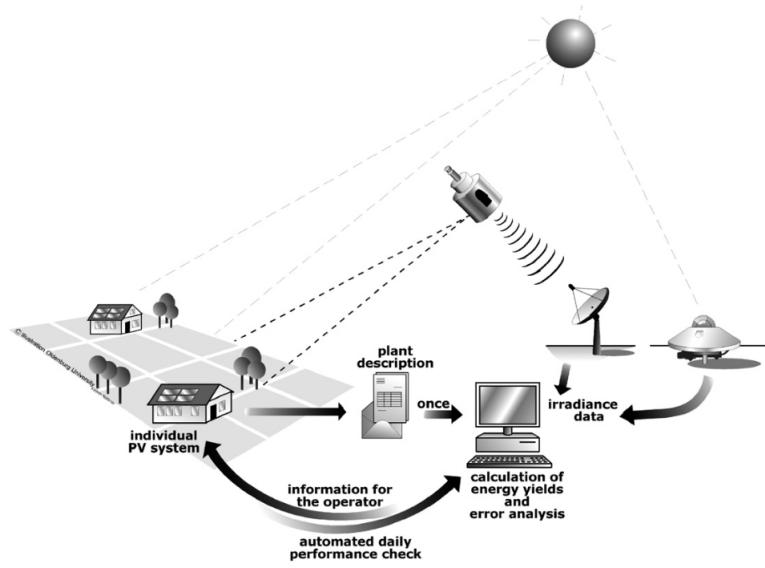


Figura 2.13: Descrição geral de funcionamento do sistema PVSAT-2 (fonte:[31])

Os dados de radiação global e de difusão são medidos numa plataforma posicionada horizontalmente, tornando necessário um cálculo suplementar para que, a partir destes, se possa obter a radiação teórica incidente do plano dos painéis tendo em consideração a orientação e inclinação dos mesmos. Para se obter tal radiação usa-se o modelo *anisotropic-all-sky* formulado por Klucher em 1979. Por último é calculada a potência teórica usando os dados de radiação obtidos no método apresentado no parágrafo anterior em conjunto com a temperatura ambiente e com os restantes parâmetros do sistema. É ainda calculada uma margem de erro por forma a evitar falsos alertas. Do diagrama da figura 2.14 podemos encontrar o processo de cálculo dessa mesma margem.

Por último, a rotina de identificação de anomalias usa os valores de potência AC teórica e medida, tal como a margem de erro calculada para determinar se existem ou não de falhas. Estas, caso existam, serão então comunicadas ao operador do sistema de geração FV[31].

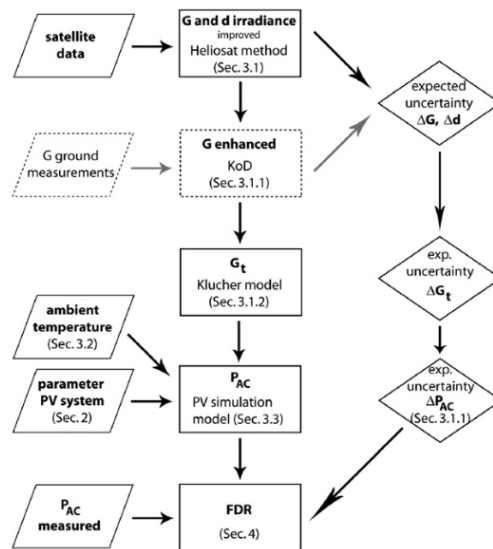


Figura 2.14: Esquema geral do sistema PVSAT-2 (fonte:[31])

A rotina de identificação permite a detecção de 3 tipos de falhas: perda constante de energia, perdas variáveis e falha completa do sistema. As perdas constantes estão relacionadas com degradação sujidade e defeitos nos módulos FV enquanto as perdas temporárias estão normalmente associadas a falhas da rede elétrica de energia, sombreamentos, aquecimento do inversor, MPPT deficiente entre outros. Por último a falha completa do sistema está normalmente relacionada com defeitos no inversor ou nos dispositivos de controlo[31].

## 2.4 POTÊNCIA EM CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES

Nesta secção são apresentados os fundamentos básicos necessários para o cálculo da potência elétrica, sendo esta ativa (Watts), reativa (VAR), e aparente (VA). A potência reativa é aquela que resulta da diferença entre a energia gerada (aparente) e a consumida (ativa) aquando da sua medição. As principais razões para o aparecimento desta diferença são o desfasamento entre a tensão e a corrente em cargas não resistivas e devido à distorção harmónica provocada por cargas não lineares[32], [33]. Um exemplo de fontes de ruído harmónico são as fontes comutadas, pois estas encontram-se em variados aparelhos que usamos no dia-a-dia[34]. No primeiro caso, visto que a potencia é gerada apenas pelo ângulo que representa o desfasamento entre a tensão e a corrente, os seus métodos de cálculo são simples. Contudo, quando falamos da potência criada em cargas não lineares, o seu método de cálculo apresenta-se muito mais complexo, não havendo sequer um consenso entre a comunidade científica sobre qual método usar [32]. Contudo, apesar da potência reativa representar energia não útil, existem já alguns sistemas com a capacidade de a compensar através da correção do fator de potência[35] [36].

### 2.4.1 POTÊNCIA EM CARGAS LINEARES

Para uma carga linear, os sinais de tensão e corrente sinusoidais são representados respetivamente por 2.3 e 2.4. Sendo que  $V_{RMS}$ ,  $I_{RMS}$ ,  $\phi$ ,  $\omega$  e  $t$  representam respetivamente a tensão eficaz, a corrente eficaz, a frequência angular, o ângulo de fase e o tempo[37] [38].

$$v(t) = \sqrt{2}.V_{RMS}.sin(\omega_0 t) \quad (2.3)$$

$$i(t) = \sqrt{2}.I_{RMS}.sin(\omega_0 t - \phi) \quad (2.4)$$

$$p(t) = v(t).i(t) \quad (2.5)$$

A equação 2.5 dá-nos a potência instantânea, que é a multiplicação das expressões 2.3 e 2.4, originando a expressão 2.6

$$p(t) = 2V_{RMS}.I_{RMS}.sin(\omega_0 t).sin(\omega_0 t - \phi) = p_p + p_q \quad (2.6)$$

Com base na relação acima apresentada, usando transformações algébricas convenientes, obtêm-se as equações 2.7 e 2.8 em que P e Q são respetivamente as potências ativa e reativa.

$$p_p = V_{RMS}.I_{RMS}.cos(\phi).(1 - cos(2\omega_0 t)) = P.(1 - cos(2\omega_0 t)) \quad (2.7)$$

$$p_q = -V_{RMS}.I_{RMS}.sin(\phi).sin(2\omega_0 t) = -Q.sin(2\omega_0 t) \quad (2.8)$$

Por último podemos colocar em evidência as duas partes da potência, ficando com as expressões 2.9 e 2.10 [37], [39].

$$P = V_{RMS}.I_{RMS}cos(\phi) \quad (2.9)$$

$$Q = V_{RMS}.I_{RMS}sin(\phi) \quad (2.10)$$

A potência ativa pode ser calculada através da média da potência instantânea ao longo do período do sinal. Este cálculo é representado pela equação 2.11, em que  $t_0$  é um instante temporal qualquer e  $T$  é o período da onda [37].

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t).i(t).dt \quad (2.11)$$

A potência aparente pode ser calculada através da multiplicação dos valores eficazes de tensão e corrente (equação 2.12). [37].

$$S = V_{RMS}.I_{RMS} \quad (2.12)$$

O fator de potência é um dos parâmetros fulcrais para determinar a qualidade da rede, refletindo quão eficientemente a energia gerada é transferida para a carga. Este é expresso pelo cosseno do ângulo que representa o desfasamento entre as ondas de tensão e de corrente[37].

$$pf = cos(\phi) \quad (2.13)$$

## 2.4.2 POTÊNCIA EM CARGAS NÃO LINEARES

Visto que todos cálculos apresentados anteriormente apenas são válidos quando estamos na presença de cargas lineares, é necessária uma abordagem um pouco mais complexa para acomodar os cálculos de potências quando estamos perante cargas não lineares. Com a não linearidade, a tensão e corrente aparecem representadas como séries de Fourier nas equações 2.14 e 2.15 respetivamente[37].

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} \sqrt{2}V_{K,RMS}cos(k\omega_0 t + \theta_k) \quad (2.14)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} \sqrt{2}I_{K,RMS}cos(k\omega_0 t + \psi_k) \quad (2.15)$$

Em que  $V_{K,RMS}$  representa o valor eficaz de tensão,  $I_{K,RMS}$  o valor eficaz de corrente,  $\psi_k$  e  $\phi_k$  as fases dos harmónicos de tensão e corrente, respetivamente, e  $V_0$  e  $I_0$  representam os valores DC da tensão e da corrente, respetivamente[37].

Tal como para as cargas lineares, também a potência instantânea é-nos dada inicialmente por 2.5, sendo representada da seguinte forma (equação2.16) [37].

$$p(t) = P + \sum_{k=1}^{+\infty} P_K cos(k\omega_0 t + \zeta_k) \quad (2.16)$$

O parâmetro  $P$  adicionado, representa a potência real, que é dada por 2.17 [37].

$$P = V_0 \cdot I_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} I_{K,RMS} V_{K,RMS} \cos(\theta_k - \psi_k) \quad (2.17)$$

A potência real por sua vez, pode ainda ser separada em 3 parâmetros,  $P_0$ ,  $P_1$  e  $P_H$ . Que representam respetivamente a potência DC, a potência ativa do harmónico fundamental e a potência harmónica ativa. Esta relação é expressa pela equação 2.18 anterior[37].

$$P = P_0 + P_1 + P_H \quad (2.18)$$

Existem diversos métodos para o cálculo da potência reativa. Entre os quais Budeanu [37], [40], IEEE Std 1459-2010[37], [41], Kimbark, Sharon [37] e Fryze[37], [40]. Contudo o método usado de forma mais regular é o método de Budeanu [37].

A definição de Budeanu propõe que a potência aparente é formada por duas componentes ortogonais: potência ativa (equação 2.17) e potência não ativa. Esta última é dividida em potência reativa (equação 2.19) e potência de distorção (equação 2.20).

$$Q_b = \sum_{+\inf}^{k=1} I_{K,RMS} V_{K,RMS} \sin(\theta_k - \psi_k) \quad (2.19)$$

$$D_b = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_b^2} \quad (2.20)$$

## 2.5 SENSORES DE CORRENTE

As mais recentes e modernas aplicações existentes em inversores, nas quais se incluem os sistemas de monitorização, e os sofisticados sistemas de controlo que existem hoje em dia, necessitam de uma correta e precisa leitura de corrente eléctrica. Como tal existem diversos modos de extrair essa informação, quer seja através da conversão da corrente em tensão com auxílio de um elemento resistivo, ou mesmo até com a leitura do campo magnético gerado pela corrente que queremos medir. Todas estas e outras soluções possuem as suas vantagens e desvantagens[42]. No que à monitorização de sistemas FV concerne, os métodos mais comuns para medições de corrente AC e DC são aqueles que se baseiam na utilização de transformadores de corrente, sensores de efeito de Hall e na sua conversão direta com auxílio de elementos resistivos. São analisados de seguida alguns desses métodos

### 2.5.1 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Os transformadores de corrente servem-se do princípio de indução magnética para fazer o *sensing* de corrente alternada. Além do seu baixo custo apresentam ainda a vantagem de possuírem isolamento galvânico. Têm contudo, a desvantagem de não possibilitarem a medição de corrente DC[43], pois não existindo alternância do sentido da corrente não existe variação de fluxo do campo magnético.

A propriedade fundamental do eletromagnetismo diz-nos que a movimentação de cargas eléctricas provoca um campo magnético com direcção dependente do sentido de movimentação da carga[44].

Com a movimentação de cargas elétricas cria-se um campo magnético cujo fluxo é representado pela equação 2.21.

$$\phi = \oint B ds \quad (2.21)$$

Por sua vez, a lei de Faraday (equação 2.22), enuncia a existência de uma força eletromotriz devido à variação no fluxo magnético, sendo responsável pelo fenómeno de indução existente nos transformadores de corrente [45].

$$EMF = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.22)$$

O transformador de corrente é constituído por um núcleo toroidal e por um enrolamento secundário, tal como exemplifica a figura 2.15. Quando o condutor que passa no seu interior possui uma corrente alternada, é gerada uma força eletromotriz aos terminais do sensor, força esta expressa pela lei de Faraday devido a variação do fluxo magnético[43].

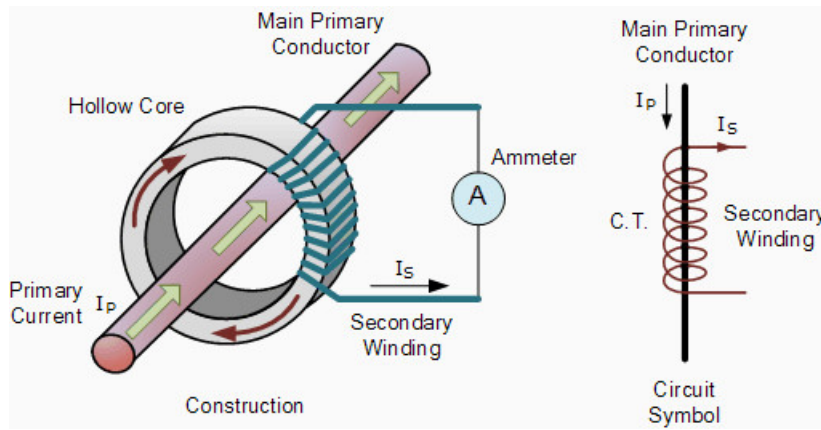


Figura 2.15: Transformador de corrente (fonte:[46])

Resta posteriormente ligar o secundário do sensor a uma resistência de baixo valor. Esta resistência é denominada por *burden resistor* e tem como objetivo converter a corrente em tensão, definindo também a tensão no secundário. Os valores para a mesma são devidamente definidos pelos fabricantes dos sensores por forma a maximizar a precisão do sensor[43].

## 2.5.2 SENSORES DE CORRENTE BASEADOS NO EFEITO DE HALL

Os sensores de corrente baseados no efeito de Hall representam a maioria das soluções de *sensing* de corrente existentes no mercado nos dias de hoje, quer seja para corrente AC ou para DC. Apresenta como vantagens o fato de possuírem isolamento galvânico e de serem capazes de disponibilizar a sua saída em tensão, corrente ou até mesmo em formato digital[42], [43].

Descoberto por Dr.Edwin Hall em 1879, o efeito de Hall é hoje em dia utilizado em larga escala, sendo uma ferramenta para o estudo da condução elétrica, detecção de campos magnéticos e até mesmo em aplicações para posicionamento e movimento de objetos. O efeito de Hall baseia-se na interação entre o movimento de cargas elétricas e um campo magnético externo. Quando um eletrão atravessa um campo magnético externo, é exercida uma força sobre o movimento do mesmo dada pela equação



2.23, denominada por força de Lorentz[47]. Na equação  $q$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$  representam respetivamente a carga eletrónica em coulomb (C), a velocidade do eletrão e o campo magnético (B). Todas as variáveis anteriormente descritas estão em notação vetorial, demonstrando assim, que a direção e magnitude da força  $\vec{F}$  está diretamente dependente da relação espacial entre o campo magnético e a direção de movimentação do eletrão[44].

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.23)$$

Para a descrição do processo assumimos que o eletrão se desloca num condutor espalmado que é colocado num campo magnético  $\vec{B}$  como está representado na figura 2.16.

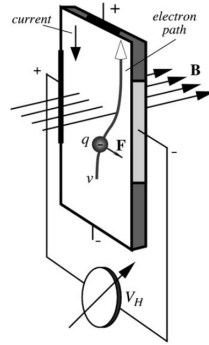


Figura 2.16: Princípio do efeito de Hall (fonte:[44])

O condutor, além dos contactos utilizados para a condução da corrente, apresenta ainda mais dois laterais, nos quais é possível medir uma determinada tensão. A força  $\vec{F}$  provoca, devido ao campo magnético aplicado, uma deflexão no movimento dos eletrões para o lado direito do condutor, criando assim uma diferença de potencial devido à concentração de cargas negativas do mesmo lado. É posteriormente possível a medição de uma tensão nos terminais laterais, denomina diferença de potencial transversal de Hall  $V_H$ . A sua magnitude e o seu sinal dependem da magnitude e direção da corrente e do campo magnético, sendo ainda proporcional ao seu produto externo (equação 2.25). O seu valor é então calculado a partir da equação 2.24 para uma temperatura fixa. Nesta equação  $h$  e  $\alpha$  representam respetivamente o coeficiente de sensibilidade (dependente da temperatura, formato e tipo de material do condutor) e o ângulo entre o vetor do campo magnético  $B$  e o condutor (figura 2.17 (a)). A figura 2.17 (b) representa o esquema elétrico do sensor.

$$V_H = hIB\sin(\alpha) \quad (2.24)$$

$$V_H \propto I \times B \quad (2.25)$$

Nos sensores de corrente, o sensor de efeito de Hall desempenha o papel de sensor de campo magnético. Na figura 2.18 está representado um esquema básico da sua aplicação. Como o campo magnético pode ser tanto positivo como negativo é obrigatória a utilização de alimentação simétrica. Contudo é possível evitar essa complexidade caso se aplique um *offset* no amplificador diferencial. Podem encontrar-se no mercado ambas as soluções.

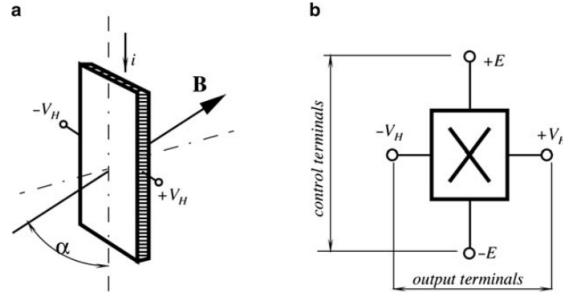


Figura 2.17: Ângulo entre condutor e campo magnético no sensor de Hall (a); Símbolo elétrico do sensor de Hall (b) (fonte:[44])

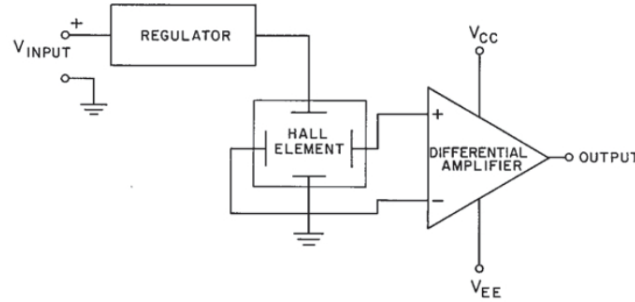


Figura 2.18: Esquema de sensor de Hall com saída linear (fonte:[47])

## 2.6 SENSORES DE TENSÃO

Nos sistemas de monitorização FV a aquisição de valores de tensões tanto DC como AC pode ser feita de diversas formas. Devido às elevadas tensões que encontramos em ambos os lados do inversor, é de todo conveniente encontrar soluções que ofereçam isolamento galvânico. São abaixo descritas algumas das soluções existentes no mercado para este problema, tais como transformadores, sensores de Hall e divisores resistivos.

### 2.6.1 TRANSFORMADORES

Os transformadores abaixo apresentados são baseados no princípio de funcionamento já anteriormente descrito. A sua utilização tem como principais vantagens o baixo custo e o isolamento que proporcionam. São, contudo, muito volumosos quando comparados com as outras soluções existentes.

Ao aplicar-se uma tensão a um enrolamento primário  $v_1$ , cria-se uma corrente de natureza semelhante no mesmo. Como tal, surge no enrolamento secundário uma tensão  $v_2$  cujo valor pode ser obtido através da equação 2.26, a qual depende do número de espiras  $N_1$  e  $N_2$  [45].

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.26)$$

A figura 2.19 apresenta o circuito elétrico da aplicação que pode ser observada nos sistemas de monitorização FV da comunidade *open energy monitor* [20]. Nessa mesma aplicação é utilizado um transformador de 230V-9V seguido de um divisor resistivo e da aplicação de uma tensão de *offset* de forma a ir de encontro à gama de conversão da ADC.

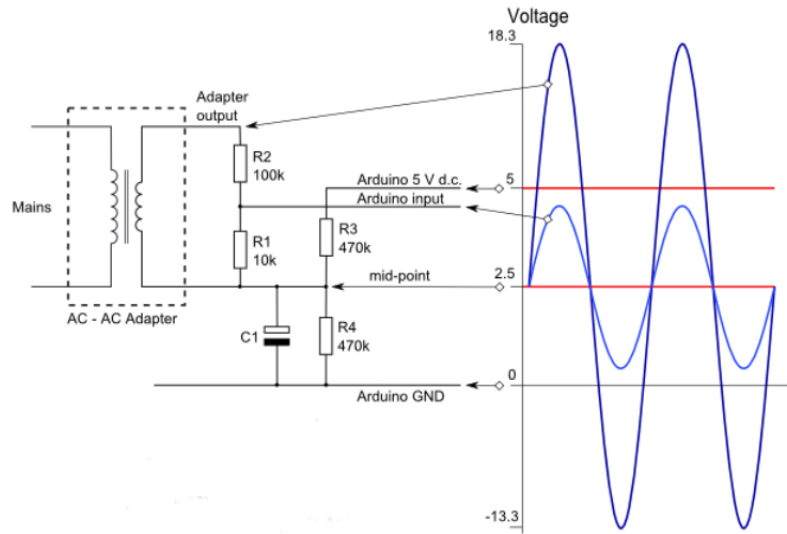


Figura 2.19: Amostragem da tensão AC com transformador e divisor resistivo (fonte:openenergymonitor.org)

## 2.6.2 DIVISORES RESISTIVOS

Apresenta-se também como uma solução bastante comum o uso de divisores resistivos na medição de tensões AC e DC. Estas aplicações são complementadas com o uso de amplificadores de isolamento com por exemplo o ACPL-790B, sendo assim garantido o isolamento entre o circuito a medir e a eletrónica de instrumentação do sinal medido. Contudo é necessário acomodar algumas particularidade com cuidado, como por exemplo respeitar o valor máximo de resistência a colocar na entrada destes mesmos amplificadores por forma a não alterar o seu funcionamento[48]. A utilização de divisores resistivos apresenta-se como uma solução bastante apelativa devido maioritariamente às reduzidas dimensões dos componentes necessários. Os custos contudo podem variar bastante dependendo das características do amplificador de isolamento pretendido[49].

## 2.6.3 SENSOR DE EFEITO DE HALL

Uma outra solução possível para a medição de tensão é a utilização de equipamentos que recorrem ao efeito de Hall, efeito este já descrito na secção dos sensores de corrente. Um esquemas ilustrativo de um sensor que usa o efeito de Hall, o EM010 da ABB encontra-se representado na figura 2.20.

A tensão que se pretende medir,  $U_p$ , é aplicada aos terminais do enrolamento primário do sensor. Este consequentemente irá provocar a circulação de uma corrente  $I_p$ , aplicando assim um campo magnético sobre o sensor de Hall. É por último utilizada uma resistência  $R_M$  para converter a saída em corrente do sensor em tensão[50].

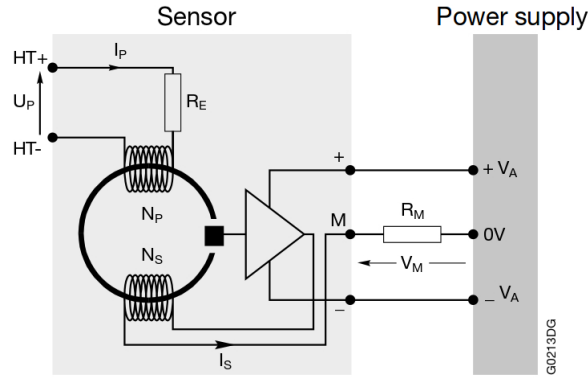


Figura 2.20: EM010 sensor (fonte:[50])

## 2.7 SENSORES DE RADIAÇÃO

Apresentando-se como um processo fundamental para o cálculo da performance dos módulos FV, a medição da radiação pode ser feita recorrendo a piranômetros e a células de referência.

Os piranômetros (figura 2.21) são largamente usados, sendo baseados por uma placa contendo uma série de termopares, termopilhas, têm como função quantificar a radiação solar. O seu formato, permite receber luz de todas as direções, sendo possível fazer medições desde a radiação ultravioleta até à infravermelha (0.3nm a 3μm). Os piranômetros colocam na sua saída uma tensão proporcional à radiação medida, sendo que o valor da última é obtido dividindo a tensão pela sensibilidade do sensor [15], [51].

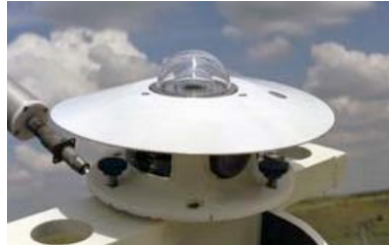


Figura 2.21: Piranómetro (fonte:[51])

As células de referência (figura 2.22), apresentam uma resposta diferente relativamente aos sensores anteriormente apresentados. Elas permitem apenas medir radiação com um comprimento de onda compreendido entre 450nm e 1150nm, não incluindo como tal todo o espectro da radiação solar[15], [51]. A saída das mesmas varia de forma linear com a radiação nelas incidente, podendo esta ser calculada através da equação 2.27. Nesta equação  $G_{ref}$ ,  $I_{sc,M}$ ,  $\alpha_{Isc}$ ,  $T_{cell}$ ,  $T_{ref}$  e  $I_{sc,ref}$  representam respetivamente a radiação de referência, a corrente de curto-circuito da célula de referência, o coeficiente de temperatura da célula, a sua temperatura, a temperatura de calibração e a corrente de curto-circuito de referência. Os valores típicos para  $T_{ref}$  e  $G_{ref}$  são de 25°C e 1000 W/m<sup>2</sup>, respetivamente[52].

$$Radiação_{REF} = \frac{I_{sc,M} G_{ref}}{1 + \alpha_{Isc} (T_{cell} - T_{ref}) I_{sc,ref}} \quad (2.27)$$

Como os piranômetros permitem medir todo o espectro da radiação solar, estes são os mais adequados para medir a radiação. Contudo, para a análise da performance dos módulos fotovoltaicos, o uso de células de referência contendo a mesma composição dos módulos FV, permite obter resultados mais

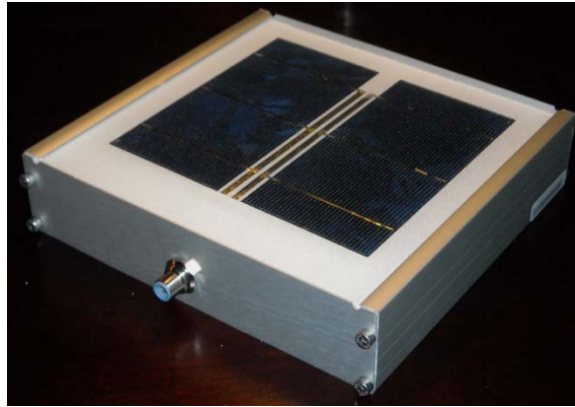


Figura 2.22: Célula solar de referência (fonte:[51])

precisos. Pois estas vão ter uma resposta ao espectro da radiação solar muito mais semelhante a dos módulos do sistemas FV[52].

## 2.8 SUMÁRIO

O presente capítulo apresentou a tecnologia existente nos dias de hoje no que diz respeito a sistemas de geração FV, monitorização de sistemas FV bem como métodos de análise e deteção de anomalias nos mesmos. No que ao sistema de geração diz respeito é feita a descrição da sua infraestrutura, análise do mercado bem como da performance dos sistemas FV. No que à monitorização dos sistemas concerne são abordados os sistemas dependentes e independentes de inversor, o *standard* que define os requisitos de monitorização de um sistema bem como o mercado dos sistemas de monitorização. Por último, nos métodos de análise e deteção de anomalias são apresentados e explicados os dois métodos mais amplamente usados.

O capítulo apresenta ainda os fundamentos para cálculo de potência em cargas lineares e não lineares, a tecnologia existente no mercado para sensores de tensão e de corrente, bem como a tecnologia atual para sensores de radiação. No que aos sensores de corrente diz respeito são abordados três tipos, transformadores de corrente, sensores de corrente baseados no efeito de Hall e resistências *Shunt*. Nos sensores de tensão por sua vez, são abordados transformadores, divisores resistivos e sensores de efeito de Hall.

# CAPÍTULO 3

## DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

---

Neste capítulo estão descritos todos os passos da implementação do *logger solar*, desde a escolha de sensores a utilizar e das fontes de alimentação necessárias ao desenho de circuitos de acondicionamento tal como a descrição do novo servidor e o desenvolvimento do código para o mesmo.

A aquisição de informação, realizada por medições de tensões e correntes tanto AC como DC, deve acomodar soluções que ofereçam um adequado isolamento devido aos elevados valores de tensão e corrente que vamos estar a medir. Estes sinais, medidos após passarem por convenientes circuitos de acondicionamento, serão então convertidos para formato digital para que possam ser processados e guardados. Estes dados guardados serão por sua vez acedidos pelo utilizador através de uma plataforma WEB.

O sistema anteriormente desenvolvido no âmbito da dissertação *Logger Sollar Independente de inversor* [18] não tinha capacidade de processamento nem de memória suficiente, pelo que foi necessário escolher um novo conjunto de *hardware* para o projeto bem como desenvolvimento de novo *software* e *firmware* para o mesmo. Este sistema também apresentava problemas no circuito de condicionamento do sinal vindo do sensor de corrente AC e como tal esse mesmo circuito foi alterado. As restantes partes do sistema, que contemplam os sensores, circuito de alimentação e de condicionamento (com exceção do circuito da corrente AC) provêm dos sistemas anteriores.

O *hardware* que corresponde à aquisição e processamento de informação, base de dados e plataforma WEB organiza-se conforme apresentado na figura 3.1.

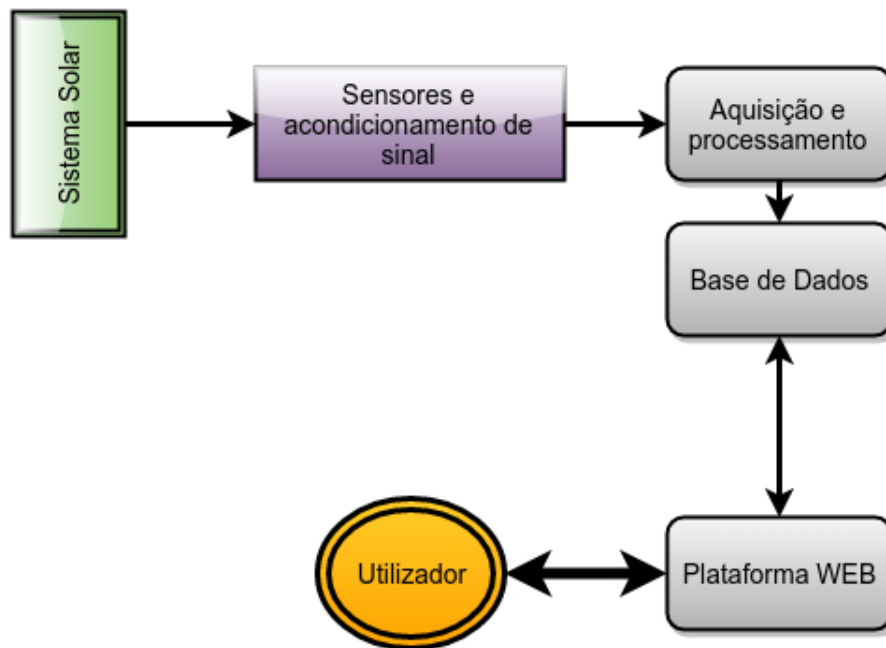


Figura 3.1: Principais módulos do sistema

## 3.1 SENSORES DE CIRCUITOS DE ACONDICIONAMENTO

Ao nível do *hardware*, os sensores usados para aquisição de informação para o sistema apresentam-se como um elemento de extrema importância, pois a exatidão e robustez da informação obtida está diretamente ligada à qualidade do sistema de monitorização em si.

### 3.1.1 SENSORES DE TENSÃO

Os sensores abaixo apresentados, tem capacidade de medir tensões nos lados AC e DC na ordem dos 1000V a 276V respetivamente. A gama de valores de leitura para o lado AC provém da pesquisa realizada na secção 2.1.1, no entanto, no que a tensão AC diz respeito, é possível definir uma variação de 20% em torno da tensão nominal de 230V. Optou-se por utilizar um amplificador de isolamento seguido de um divisor resistivo em vez de um transformador devido ao facto de esta ser uma solução mais simples e de ocupar muito menos espaço.

Da pesquisa de mercado encontram-se varias soluções, entre elas as que estão apresentadas na tabela 3.1



	Tipo	Prod.	Vend.	Encaps.	Input	Alimen.	Erro máx.	Isolação máx.	Preço
HCPL-7800A	Acopla. óptico	Avago	Farnell	DIP-8	$\pm 2V$	4.5-5V	$\pm 0.35\%$	891V	€ 10.58
ISO124P	Acopla. óptico	TI	Farnell	DIP-16	$\pm 12V$	$\pm 15V$	$\pm 0.5\%$	2400V	€ 17.53
HCPL-788J-00E	Acopla. óptico	Avago	Farnell	SOP-16	$\pm 2V$	4.5-5V	$\pm 0.4\%$	1230V	€ 7.25
ACPL-790B-300E	Acopla. óptico	Avago	Farnell	DIP-8	$\pm 2V$	4.5-5V	$\pm 0.13\%$	891V	€ 6.87
ISO122JF	Galvânicc	TI	Mouser Elect.	PDIP-8	$\pm 10V$	4.5V a $\pm 18V$	$\pm 0.05\%$	2400V	€ 20.12
AMC1100	Galvânico	TI	Mouser Elect.	SOP-8	-0.16V a VDD1	4.5V a 5.5V	1%	1200V	€ 4.56
ISO122-UE4	Acopla. óptico	Avago	TI	SOIC-28	$\pm 10V$	$\pm 4.5V$ a $\pm 18V$	$\pm 0.02\%$	1.5kV	€ 20.85
HCPL-7840-000E	Acopla. óptico	Avago	Farnell	DIP-8	$\pm 2V$	4.5-5V	$\pm 0.35\%$	3.75kV	€ 5.59

Tabela 3.1: Lista de amplificadores de isolamento

Da tabela apresentada foi escolhido o produto ACPL-790B-300E da Avaco Technologies pois este além de uma boa relação qualidade preço possui ainda um encapsulamento DIP-8. É agora preciso dimensionar os divisores resistivos de forma a que a tensão máxima na entrada do transformador não ultrapasse os 0.3V de forma a evitar fenómenos de saturação[48]. O seu ganho de valor fixo de 8.196 (G1) é um valor importante a ter em conta ao dimensionar-se o circuito de acondicionamento de sinal. Ainda no que diz respeito às recomendações de aplicação deste mesmo amplificador são usadas resistências e condensadores, presentes nas figuras 3.3 e 3.5 tal como um amplificador diferencial devido à natureza diferencial do sinal da sua saída.

Nos circuitos de leitura de tensões AC e DC dimensionados para este projeto são usados também condensadores de desacoplamento de sinal na alimentação de cada integrado usado tal como é ainda usado um *buffer* em cada saída. O uso deste último tem como finalidade limitar a tensão à entrada da ADC a 3.3V por forma a proteger o portos da mesma. Os ganhos G1 e G2 apresentados nas figuras 3.4 e 3.2 são atribuídos de a forma a obter uma tensão máxima em V0 (figuras 3.5 e 3.3) que não ultrapasse os 3.25V, para aproveitar ao máximo a gama de conversão da ADC. São ainda acrescentados filtros em ambos os circuitos por forma a filtrar o ruído existente. São apresentados agora os cálculos necessários para cada um dos circuitos.

Para o circuito de leitura de tensão DC, descrito nas figuras 3.2 e 3.3, o divisor resistivo é dimensionado por forma a garantir os requisitos de leitura do amplificador de isolamento. Usando então a fórmula 3.1 obtemos os valores de  $3.3M\Omega$  e  $976\Omega$  para  $R_2$  e  $R_3$  respetivamente.

$$V_x = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.1)$$

Por sua vez, o ganho G2 deste circuito é calculado usando a equação 3.2. Obtemos então os valores de  $3556\Omega$  e  $4700\Omega$  para as resistências Rf e R1 (ver figura 3.3) respetivamente. Como não existem resistências de  $3556\Omega$ , usa-se  $3300\Omega$  e  $270\Omega$  em série no seu lugar. Convém notar que a

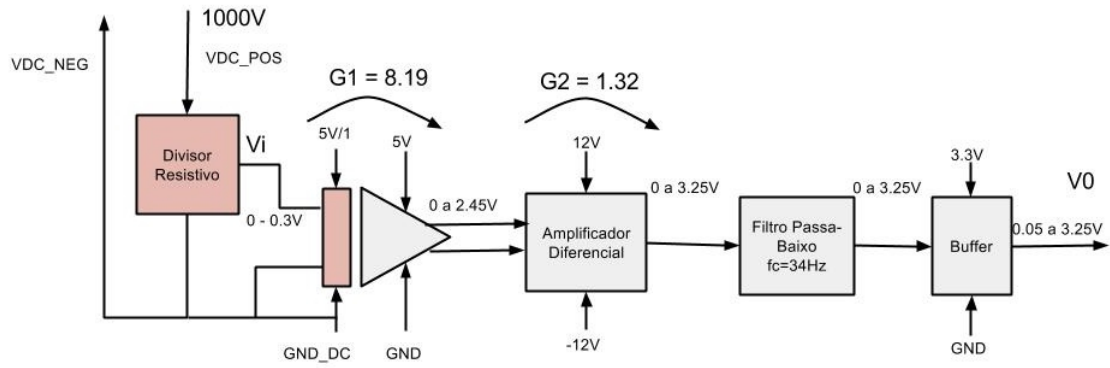


Figura 3.2: Diagrama de blocos para o circuito de leitura da tensão DC[18]

expressão do ganho  $G2$  apresentada na equação 3.2 resulta de uma simplificação teórica pois assume-se que a impedância em ambos os ramos do amplificador é teoricamente igual[53]. O filtro passa baixo implementado, usa o condensador  $C_f$  e a resistência  $R_f$ , cujo valor da resistência é já sabido do cálculo do ganho  $G2$ . Ao usar-se um condensador de capacidade de  $1\mu F$  obtém-se, através da equação 3.3, um frequência de corte para o filtro na cada dos 34Hz. Este valor tem como atenuar a interferência devido aos 50Hz da rede, bem como reduzir o ruído.

$$V_{out} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \frac{R_f}{R_1} \left[ \frac{1}{R_f C_f s + 1} \right] \quad (3.2)$$

$$C_f = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot f_c} \quad (3.3)$$

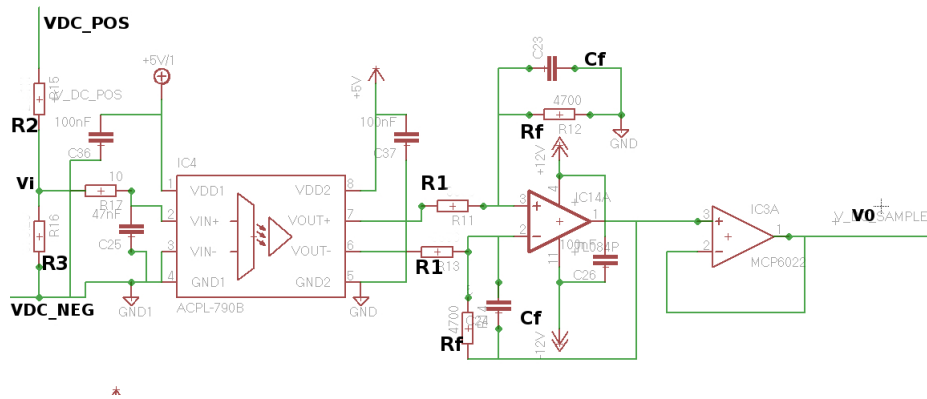


Figura 3.3: Circuito de leitura da tensão DC[18]

No circuito responsável pela leitura da tensão AC, é realizado um dimensionamento muito semelhante àquele descrito acima. Contudo este diferente na necessidade de se introduzir um circuito adicional por forma a lidar com a parte negativa do sinal, pois a ADC não consegue lidar com valores negativos. O diagrama de blocos do circuito vem apresentado na figura 3.4.

A questão relativa à existência de valores negativos pode ser resolvida através da adição de uma tensão de *offset* ou pela retificação desses mesmos valores. A retificação aparece como uma proposta bastante simples, contudo tem uma grande desvantagem na perda de amplitude do sinal pois existe

queda de tensão causada pelos díodos retificadores. Seria então necessário aumentar ainda mais o ganho por forma a compensar esta perda de amplitude, isto claro se for pretendido o uso ao máximo da gama dinâmica da ADC. Como o aumento do ganho traz inevitavelmente agregado a si o aumento do ruído, a retificação acabar por não se apresentar como uma solução tão vantajosa quanto isso. A adição de uma tensão de *offset* pode realizar-se recorrendo a circuitos integrados para gerar tensões de referência, divisores resistivos e a díodos *zener*. Optou-se pela última solução devido à sua baixa complexidade de aplicação e ao seu custo reduzido.

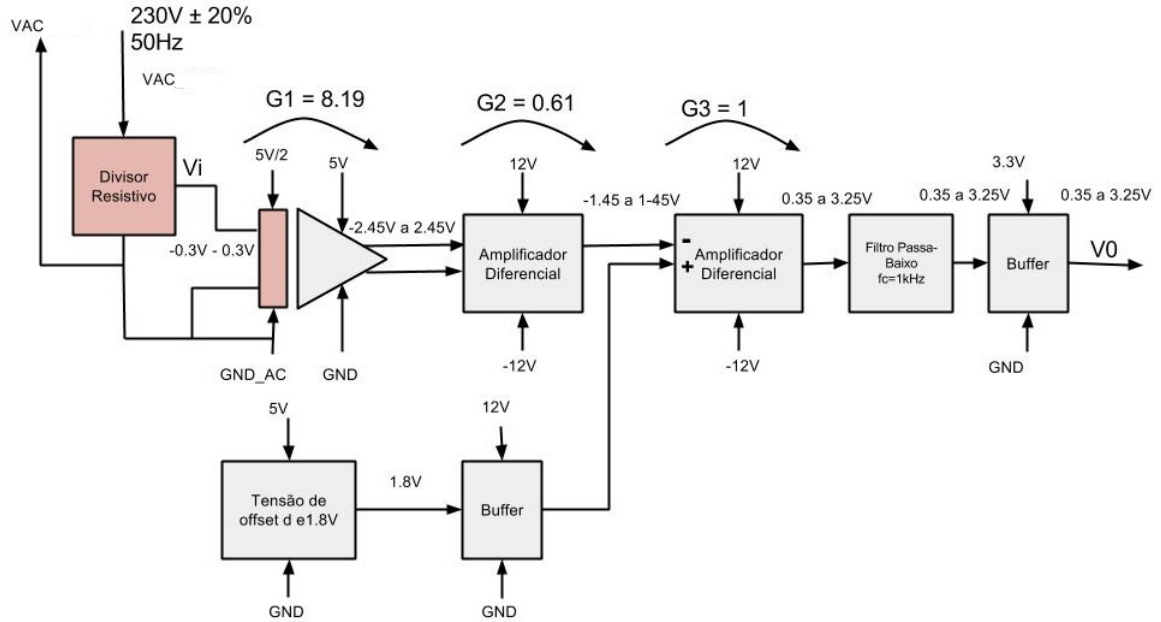


Figura 3.4: Diagrama de blocos do circuito de leitura da tensão AC[18]

O divisor resistivo usado no circuito da tensão AC é dimensionado usando os mesmos métodos apresentados para o seu homólogo da tensão DC. Como tal, obtiveram-se os valores de  $3.3\text{M}\Omega$  e  $2.5\text{k}\Omega$  respetivamente para as resistências  $R_1$  e  $R_2$  do mesmo. Antes de se poder calcular o valor do ganho  $G_2$  é neste caso necessário definir a tensão de *offset* que irá ser usada.

Por forma a ser possível usar toda a gama dinâmica da ADC, a tensão de *offset* deveria ser exatamente metade da tensão máxima permitida à entrada da ADC. Recorreu-se então ao uso de um *zener* cuja tensão de polarização inversa é de  $1.8\text{V}$ . Este valor apesar de ser ligeiramente superior ao teoricamente pretendido, continua a permitir o uso de uma grande parte da gama dinâmica da ADC. A polarização do mesmo é feita recorrendo a uma tensão de  $5\text{V}$  e a uma resistência de  $640\Omega$  que geram uma corrente de aproximadamente  $5\text{mA}$ . Por fim é ainda colocado um *buffer* à saída do circuito por forma a garantir uma impedância muito baixa à saída do mesmo, por forma a garantir o maior equilíbrio possível entre as impedâncias dos dois ramos do amplificador diferencial (andar de ganho  $G_3$ ).

A escolha de um valor de  $1.8\text{V}$  para valor de *offset* limita a amplitude máxima do sinal a  $1.45\text{V}$ , por forma a que este depois de somado a primeiro não ultrapasse os  $3.25\text{V}$ . Procedeu-se posteriormente ao cálculo dos valores das resistências que geram o ganho  $G_2$  usando a já conhecida equação 3.2. Obteve-se com esta os valores de  $4700\Omega$  e  $7680\Omega$  para as resistências  $R_2$  e  $R_1$  respetivamente. O filtro passa-baixo implementado neste circuito foi dimensionado por forma a ter uma frequência de corte de  $1\text{kHz}$ . Como tal usando a equação 3.3 chegamos a um valor de  $33\text{nF}$  para o valor de  $C_f$ . O valor da frequência de corte do filtro tem como objetivo filtrar o ruído existente, mas ao mesmo tempo permitir

a medição dos harmônicos da rede, sendo que os de maior importância são o 3º(150Hz), o 5º(250Hz) e o 7º(350Hz) [54].

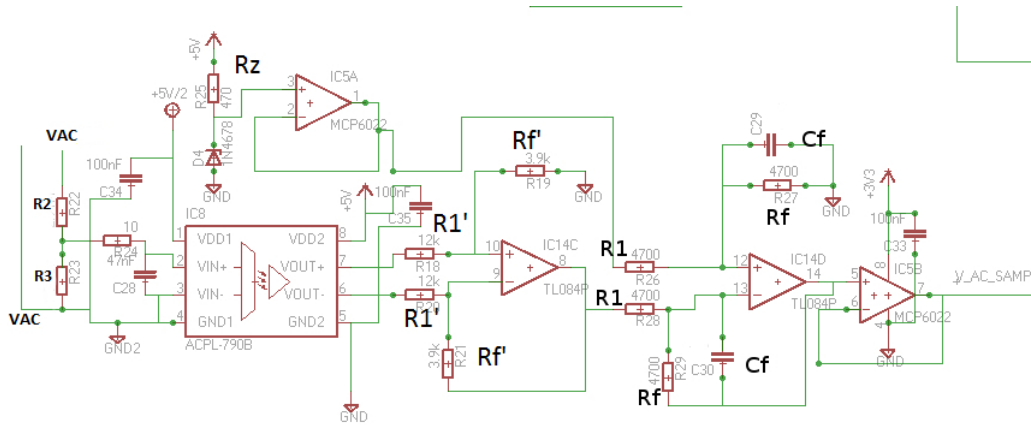


Figura 3.5: Circuito para a leitura da tensão AC[18]

É posteriormente usado um amplificador diferencial com o intuito de somar a tensão de *offset* gerada ao sinal. Contudo esta operação inverte a polaridade do sinal, a qual deverá ser corrigida no software.

Relativamente às necessidades de alimentação para todos os circuitos apresentados até agora é necessária a existência de duas fontes de alimentação de 5V para os amplificadores de isolamento (uma para o lado de entrada e outra para o lado da saída), duas fontes simétricas que disponham 12V e -12V para alimentarem os amplificadores em configuração diferencial e por último uma fonte de 3.3V para alimentar todos os *buffers* que existem à saída dos circuitos.

### 3.1.2 SENSORES DE CORRENTE

Tal como acontece em relação à tensão, a mediação dos valores de corrente tanto AC como DC representa um passo de extrema importância no projeto. A gama de valores a medir depende do sistema de geração, podendo atingir um valor máximo de 72A para sistemas industriais, como se refere na secção 2.1.1. Neste trabalho propõe-se a utilização de um sensor que consiga ler valores de corrente até 30A, pois este é um valor que abrange já uma vasta gama dos equipamentos listados em 2.1.1. De forma a fazer-se uma melhor seleção do sensor a usar, listaram-se na tabela 3.2 algumas das soluções existentes nos mercados.

	Tipo	Fabri.	Vend.	Input	Alimen.	Erro	AC/DC	Preço
TQL100A	Efeito de Hall	Multicomp	Farnell	$\pm 100A$	$\pm 12V$ a $\pm 15V$	0.3%	✓ / ✓	€ 20.85
GCBC040	Efeito de Hall	Alps	Mouser elec.	$\pm 40A$	$\pm 5V$	-	✓ / ✓	€ 8.15
TH30A	Efeito de Hall	Multicomp	Farnell	$\pm 30A$	$\pm 15V$	-	✓ / ✓	€ 4.78
CSE187L	Transf.	Triad mag.	Mouser elec.	$\pm 30A$	-	-	✓ /	€ 2.75
CSLA1CD	Efeito de Hall	Honeywell	Farnell	$\pm 57A$	$\pm 8$ a $\pm 16V$	-	✓ / ✓	€ 14.62
CS60-050L	CT	Coilcraft	Farnell	$\pm 50A$	-	-	✓ /	€ 11.32
CSLA2CF	Efeito de Hall	Honeywell	Farnell	$\pm 125A$	6V a 12V	-	✓ / ✓	€ 19.83
HAL 50 - S	Efeito de Hall	LEM	Farnell	$\pm 150A$	$\pm 15V$	1%	✓ / ✓	€ 38.86

Tabela 3.2: Lista de sensores de corrente

Da pesquisa efetuada, destaca-se o sensor de efeito de Hall TH30A pois este apresenta reduzidos custos e dimensões, tal como capacidade de leitura até 30A, como pretendido. Este, contudo, traz uma grande desvantagem pois tem de ser colocado em série com o circuito a medir, o que torna a conceção da PCB uma tarefa muito mais complexa, devido às elevadas correntes que pretendemos medir. Selecionaram-se então sensores que não exigissem contacto elétrico por forma a evitar este problema, ficando com o CSLA1CD para correntes DC e o CS60-050L para correntes AC. Embora o sensor escolhido para o lado DC possa ser também usado no lado AC, o CS60-050L apresenta em relação ao último as vantagens de não requerer alimentações e de ter um custo inferior de aquisição.

De forma semelhante ao que acontece nos circuitos de acondicionamento do lado DC, também aqui se colocam condensadores de desacoplamento à entrada dos circuitos integrados e um *buffer* em cada saída.

O diagrama de blocos relativo a corrente DC é apresentado na figura 3.9.

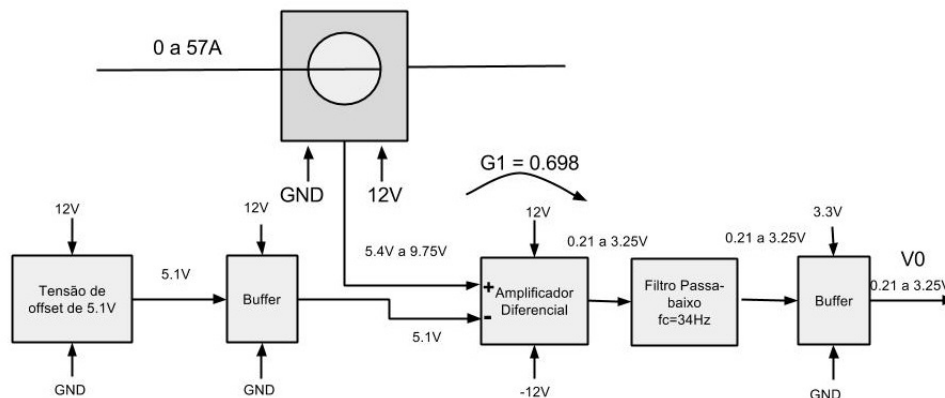


Figura 3.6: Diagrama de blocos do circuito de leitura de corrente DC[18]

O sensor CSLA1CD, gera uma tensão de *offset* que é cerca de metade do seu valor de alimentação, com uma incerteza de  $\pm 10\%$ . Uma vez que neste caso o sensor vai ser utilizado para medir no mínimo

um valor de 0A, não existindo como tal a leitura de valores negativos, deve-se anular esse valor de *offset* por forma a tirar o máximo partido possível da gama dinâmica da ADC. Devido à incerteza de 10% associada ao valor do *offset* optou-se por anular o seu valor mínimo, calculado através da equação 3.4, via *hardware*. Posteriormente será ainda feita uma correção adicional por *software*. Como tal, usando a equação anteriormente referida e assumindo um tensão de alimentação de 12V, ficamos com um valor de 5.4V a anular via *hardware*.

Procede-se ao anulamento desta tensão através de um amplificador diferencial (andar de ganho G1), o qual faz a subtração de uma tensão de referência ao sinal de saída do sensor. A tensão de referência em causa é gerada recorrendo a um diodo de *zener* cuja tensão de polarização inversa é de 5.1V. A polarização deste é feita com uma resistência de 1.2k $\Omega$  em conjunto com uma tensão de 12V. Foi colocado um *buffer* entre a tensão gerada no *zener* e o amplificador diferencial para que a baixa impedância de saída do *buffer* garanta o máximo equilíbrio possível de impedâncias nos ramos do amplificador diferencial.

Para que seja possível a utilização da capacidade completa de medida do sensor em causa (57A), recorreu-se à equação 3.5 para se calcular o valor máximo de tensão à saída do sensor, obtendo-se o valor de 9.75V. Nesta equação  $\epsilon$ ,  $\delta\epsilon$  e  $I_{max}$  representam respetivamente a sensibilidade, a sua tolerância e a corrente máxima a ser medida. A equação 3.6 permite-nos agora então calcular o ganho necessário para que a atenuação do sinal garanta uma tensão máxima à entrada da ADC de 3.25V. Com a equação anterior a apresentar um ganho na casa dos 0.698, recorrendo à equação 3.2 calcula-se os valores de  $R_f$  e  $R_1$  como sendo cerca de 4k7 $\Omega$  e 6724 $\Omega$ , respetivamente.

$$V_{sensor(min)} = \frac{V_{cc} \times 0.9}{2} \quad (3.4)$$

$$V_{sensor(max)} = \frac{V_{cc} \times 1.1}{2} + (\epsilon + \Delta\epsilon) \cdot I_{max} \quad (3.5)$$

$$G = \frac{V_{adc(max)}}{V_{sensor(max)} - V_{ref}} \quad (3.6)$$

O dimensionamento do filtro passa-baixo neste caso, é realizado usando os mesmos valores dimensionados para o filtro homólogo que está no circuito de acondicionamento da tensão AC. Ficamos então para uma frequência de corte de 34Hz com um valor de 1 $\mu$ F para o condensador  $C_f$ . A figura 3.7 apresenta o circuito implementado.

A medição da corrente AC é feita usando o transformador CS60-050L. O diagrama de blocos e o circuito de acondicionamento encontram-se respetivamente as figuras 3.9 e 3.10. Para se converter a corrente produzida pelo transformador em tensão, recorre-se a uma resistência de 200 $\Omega$  tal como é especificado no *datasheet* do sensor em causa. Através da análise da figura 3.8, conclui-se que para o valor máximo de corrente definido para este sensor(50A), obtém-se uma tensão de 300mV eficazes, o que resulta numa tensão de pico de 424mV. Com uma sensibilidade de cerca de 6mV/A. Por forma a se contornar o problema da tensões negativas, tal como já se fez para a leitura de tensão AC, soma-se aos valores de tensão que variam entre  $\pm 424$ mV um *offset*. Para tal, vamos utilizar um amplificador na configuração diferença para que este subtraia o sinal do sensor ao valor do *offset*. A tensão cujo valor é anteriormente referido é gerada recorrendo a um fonte de tensão de referência seguida de uma divisor resistivo. Por razões de disponibilidade de componentes usamos um integrado TL431C que gera uma tensão de referência de 2.5V[55]. Usando agora a equação 3.1 e sabendo que para usarmos ao máximo a gama dinâmica da ADC devemos de ter um *offset* na casa dos 500mV, obtemos os valores de 82k $\Omega$  e 330k $\Omega$  para as resistências do divisor resistivo. Para se garantir um ganho de aproximadamente 3 e

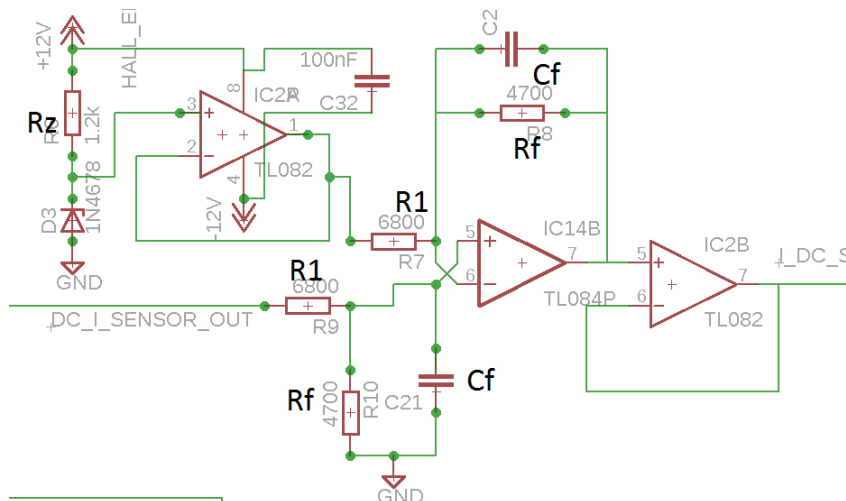


Figura 3.7: Circuito de leitura da corrente DC[18]

sabendo que este último é dado pela equação 3.7, calculamos então os valores de  $82\text{k}\Omega$  e de  $220\text{k}\Omega$  para as resistências  $R_1$  e  $R_2$  respetivamente (ver figura 3.10). A polarização da fonte de referência é feita recorrendo a uma resistência de  $220\Omega$  e a uma tensão de  $5\text{V}$ .

No final do circuito é colocado um *buffer* para garantir a proteção da ADC contra tensões demasiado elevadas, pois caso estas ultrapassem os valores permitidos para a ADC danifica-se o *buffer* e não os portos da ADC.

$$G = \frac{R_1}{R_2} \quad (3.7)$$

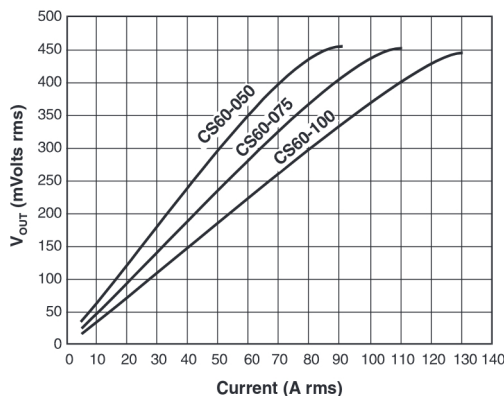


Figura 3.8: Curva de resposta dos sensores da serie CS60 (fonte: [56])

Tal como na aquisição da tensão AC, também aqui se implementa um filtro passa-baixo com frequência de corte a  $1\text{kHz}$ . Recorrendo a equação 3.3 para o seu dimensionamento, obtém-se uma capacidade de  $723\text{nF}$  para o condensador  $C_f$  assumindo que este é colocado em paralelo com a resistência de  $220\Omega$  que está à saída do sensor a fazer a conversão de corrente em tensão. É ainda utilizado o paralelo dos condensadores de  $680\text{nF}$  e  $47\text{nF}$  por forma a garantir tal capacidade.

Para a alimentação dos circuitos de medição de corrente aqui apresentados, é necessária a implementação de fontes de alimentação de  $12\text{V}$ ,  $5\text{V}$  e de  $3.3\text{V}$ .

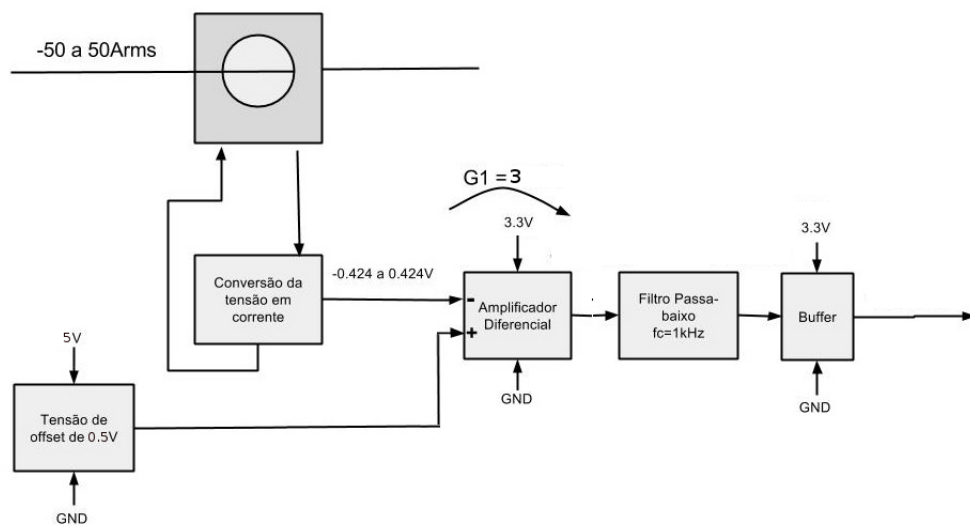


Figura 3.9: Diagrama de blocos do circuito de corrente AC

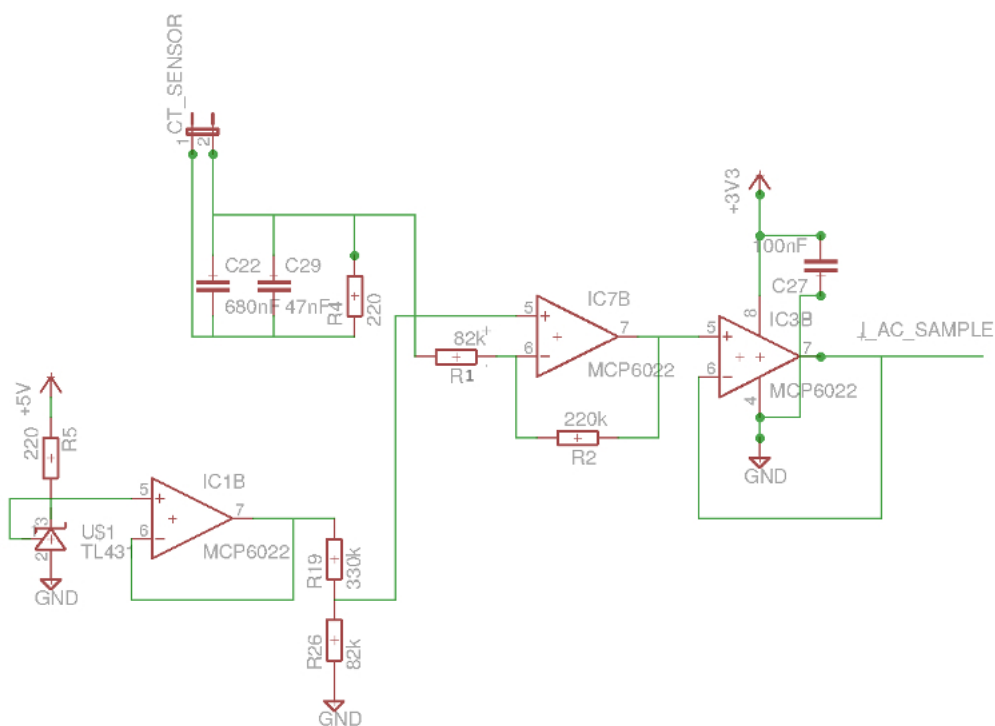


Figura 3.10: Circuito elétrico do sensor de corrente AC e respetivo circuito de acondicionamento

### 3.1.3 SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR

O sensor de radiação usado no projeto tem como o objetivo fornecer a informação que faltava até agora para ser possível fazer a deteção de anomalias no sistema. A escolha incidiu sobre a utilização de uma célula semelhante às que são usadas nos painéis pois, desta forma, garantimos um desempenho muito mais próximo entre o sensor e os módulos nos quais pretendemos detetar anomalias.

Durante a realização desta prova de conceito foi usado o mini painel apresentado na figura 3.11.

O esquema elétrico implementado encontra-se presente na figura 3.12, sendo que se usou um



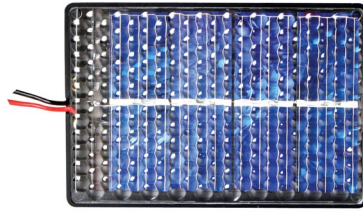


Figura 3.11: Mini painel solar SOL4 Velleman[18]

*buffer* à saída tal como em todos os circuitos anteriormente apresentados tal como se usou um divisor resistivo e um *buffer*, por forma a evitar que o sinal à entrada **ADC!** nunca ultrapasse os 3.3V. O divisor resistivo foi implementado recorrendo a *sockets* por forma a que este seja alterável para poder se adaptar a variados sensores. No caso do painel apresentado na figura, este apresenta um tensão máxima de 2V e uma corrente máxima de 200mA.

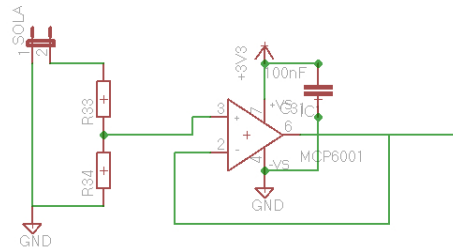


Figura 3.12: Circuito do sensor de radiação solar[18]

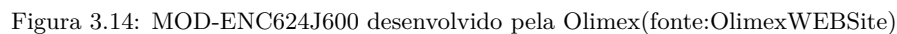
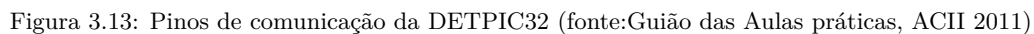
## 3.2 PROCESSAMENTO E SERVIDOR WEB

Na secção anterior foi descrito o processo de dimensionamento do *hardware* responsável por gerar sinais que contêm a informação acerca das 5 principais grandezas do sistema de geração FV: as correntes DC e AC, as tensões DC e AC e por último a radiação. Estas contudo, são ainda representadas por sinais analógicos o que impossibilita o processamento digital da informação por elas representada. É então necessário como tal converter estes sinais para o formato digital, para que após convertidos possam ser processados por meio de *device drivers* e software adicional. Os dados processados serão armazenados numa memória não volátil para que depois possam ser disponibilizados através de uma plataforma WEB.

Sendo que do projeto do ano anterior vinha a conclusão de que era necessário uma nova plataforma cuja capacidade de processamento envolvesse no mínimo um PIC32, foi realizada uma procura acerca das soluções de mercado para placas de desenvolvimento que possuíssem PIC32, interface *ethernet* e vários portos I/O. A interface *ethernet* nasce da necessidade da implementação do servidor WEB enquanto os portos vêm colmatar a necessidade de iteração com *hardware*, quer para leitura dos sinais pela ADC como até mesmo para comunicar com outros dispositivos de armazenamento.

Contudo, como as placas de desenvolvimento existentes no mercado que disponibilizam interface *ethernet* apresentam, além de um elevado custo, reduzida disponibilidade de portos I/O, decidiu-se

As figuras 3.13 e 3.14 apresentam respectivamente os pinos de ligação disponíveis na placa DETPIC32 e no MOD-ENC624J600.



Os dados processados serão armazenados num cartão *microsd*. Para que tal seja possível recorre-se ao módulo produzido pela LC Studio [57], representado na figura 3.15. A comunicação do módulo com a placa DETPIC32 é efetuada usando o protocolo de comunicação SPI. Nesta comunicação o cartão de memória funciona como *slave* sendo que o microcontrolador apresenta-se como sendo o *master*.

38

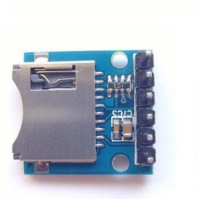


Figura 3.15: Módulo para cartão de memória

No que a alimentações diz respeito, é necessário alimentação de 3.3V para a placa DETPIC32, para o MOD-ENC624J600 e para o cartão de memória. É também recomendado que se garanta uma disponibilidade de corrente suficiente (estimada na secção seguinte) pois o módulo *ethernet* usado não só consome 300mA em *idle* como possui picos de consumo de corrente durante a sua operação.

### 3.3 TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO

No projeto deste sistema, temos a necessidade de isolar as tensões e correntes de elevado valor. Para tal recorremos à utilização de 2 transformadores, tal como representado na figura 3.16. Optou-se então pela utilização de um transformador de elevadas dimensões para fornecer a alimentação necessária ao circuito, e de um outro transformador de menores dimensões, este último com dois enrolamentos secundários, com o objetivo de gerar tensão para cada um dos amplificadores de isolamento. Para além das tensões, é necessário também definir qual a corrente máxima que cada transformador tem que fornecer ao seu respetivo circuito, por forma a que se possa dimensionar adequadamente o transformador e eletrónica associada.

Na figura 3.18 temos um diagrama dos componentes usados, tal como as tensões e correntes que estes mesmos requerem para um correto funcionamento.

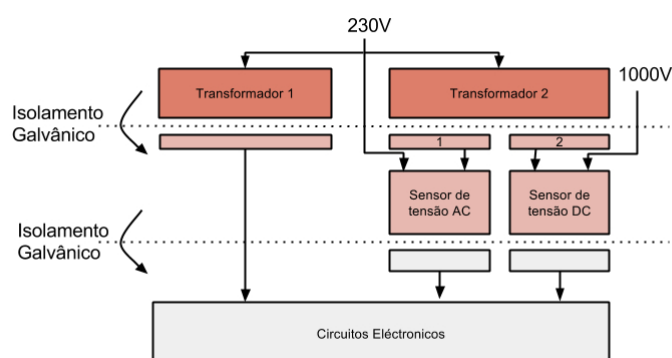


Figura 3.16: Esquema de fontes de alimentação[18]

Deste último podemos concluir que existe um débito total de 510mA no transformador 1 e de 18.5mA em ambos os secundários do transformador 2.

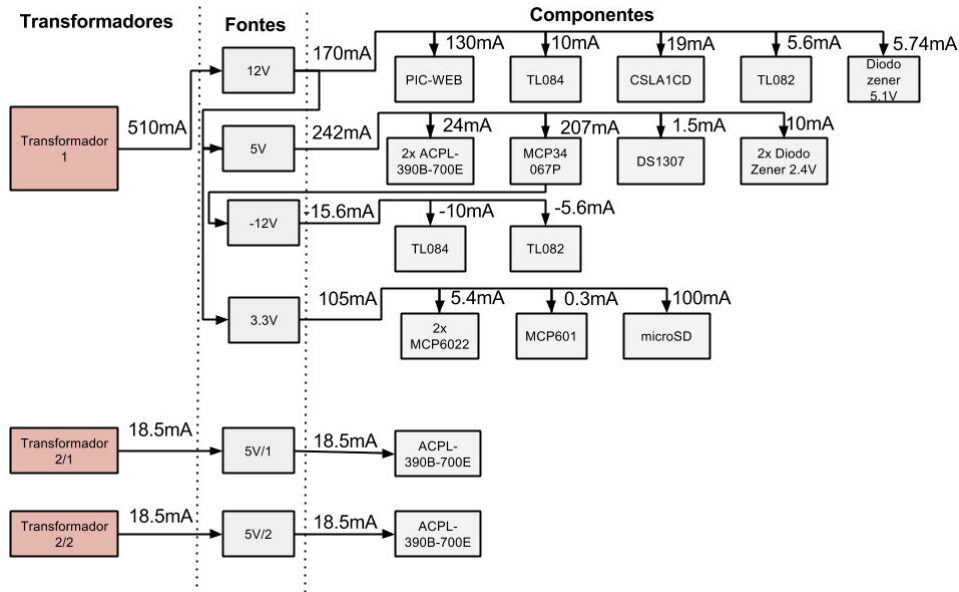


Figura 3.17: Diagrama com os requisitos de corrente e tensão[18]

Depois da análise dos transformadores existentes no mercado, optou-se pela utilização do transformador CTFC12-9 para a parte de alimentação de eletrônica, pois este possui uma corrente nominal de 667mA, uma tensão no secundário de 18V e o mais reduzido preço de mercado. Para a alimentação dos amplificadores de isolamento a escolha recaiu sobre o Myrra 44167 com dois enrolamentos secundários.

O *hardware* implementado para a eletrônica necessita de fontes de alimentação para 12V, 5V, 3.3V e -12V. A figura 3.18 apresenta o diagrama das respectivas fontes de tensão.

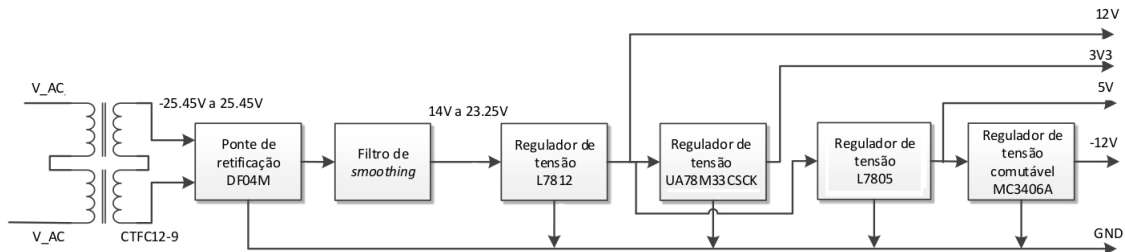
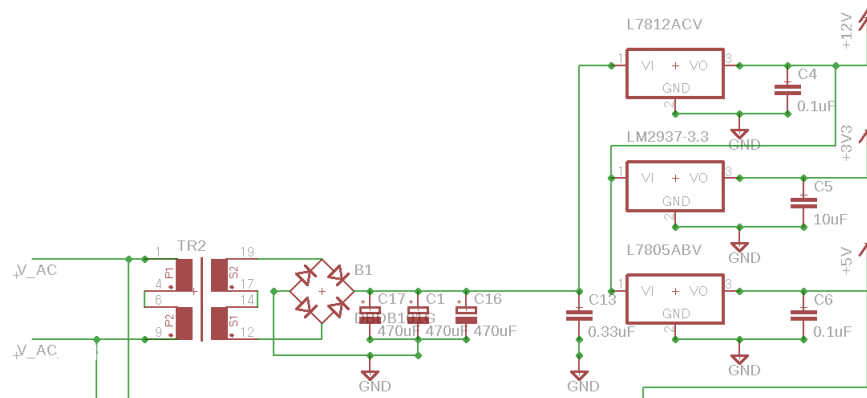


Figura 3.18: Diagrama de blocos das fontes de alimentação da parte eletrônica[18]

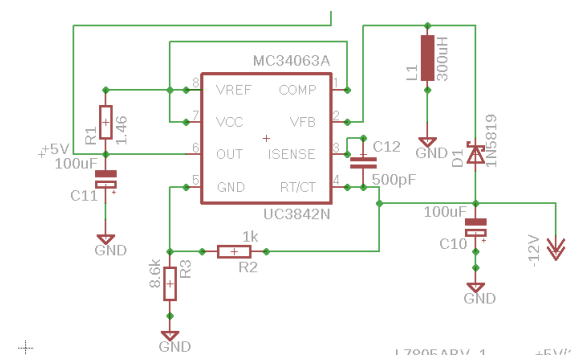
A retificação do sinal e a sua filtragem têm que ser dimensionadas para a tensão mínima que é necessário garantir à entrada dos reguladores de tensão, para que possamos assim garantir a tensão de *dropout*. Os valores de tensão encontram-se na figura 3.18.

A implementação da tensões de 12V, 5V e 3V3 realizou-se recorrendo a reguladores L7812ACV, L7805ABV e UA78M33KCS respectivamente. A figura 3.19 apresenta o circuito que implementa as mesmas.

Para o dimensionamento da fonte de -12V a escolha recaiu sobre o regulador de tensão comutada MC34063A na sua configura inversora (figura3.20), pois este necessita na sua entrada de uma tensão entre os 4.5V e os 6V, o que nos permite usar a tensão de 5V gerada anteriormente pelo regulador L7805ABV.



Já para as fontes de alimentação dimensionadas para os amplificadores de isolamento, o diagrama do circuito está apresentado na figura 3.21. Com o objetivo de garantir um queda de tensão no regulador superior à tensão de *dropout*, especificou-se inicialmente uma tensão de *ripple* máxima, com o objetivo de determinar a capacidade mínima do filtro a usar. O circuito usado para implementar estas mesmas fontes encontram na figura 3.22.



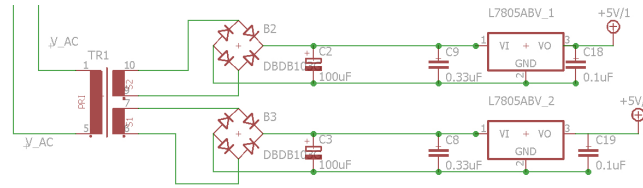


Figura 3.22: Circuito das fontes de alimentação 5V para os amplificadores de isolamento[18]

## 3.4 FIRMWARE

Nesta secção é apresentada a implementação do *firmware* relativo a *device drivers* e a processamento de informação.

O microcontrolador para além de executar as rotinas relativas à implementação do servidor HTTP, cuja descrição será feita na secção seguinte, tem que fazer a aquisição de tensões e correntes do lado AC e DC do sistema, a leitura do sensor de radiação e o posterior processamento de todos os dados adquiridos até que estes sejam armazenados.

Para tal foram desenvolvidos dois blocos de código distintos. O primeiro é composto pelas rotinas de serviço à interrupção que tem como função a leituras dos canais da ADC em instantes definidos. O segundo bloco tem como funções principais o processamento dos dados adquiridos pelo primeiro, iteração com a base de dados e execução das rotinas que implementam o servidor HTTP. O segundo bloco corre em ciclo infinito. Segue-se a descrição mais detalhada de cada um destes blocos, bem como da forma como eles interagem entre si.

### 3.4.1 AQUISIÇÃO

A aquisição de dados da ADC nas rotinas de serviço à interrupção é realizada segundo o diagrama apresentado na figura 3.23. Os valores de tensão e corrente AC são lidos a um frequência de 1kHz, enquanto que os dados relativos à tensão AC, à tensão DC e à leitura do sensor de radiação são lidos a uma frequência de 10Hz. As duas frequências de amostragem são garantidas numa única rotina de serviço a interrupção com auxílio de um contador inteiro. Quando este atinge o valor 100 é feita a da aquisição das variáveis de 10Hz tal como o *reset* ao contador.

Os dados lidos são colocados em *buffers* circulares para que depois os mesmos possam ser processados pelo bloco de código que contempla o processamento dos mesmos. De notar que existe um *buffer* circular para cada um dos sinais do sistema que estamos a ler, existindo como tal cinco *buffers*.

Os *buffers* circulares implementados garantem uma correta interação entre os dois blocos de código descoplando a aquisição dos dados do respetivo armazenamento. A figura 3.24 ilustra o funcionamento de um *buffer* circular. Neste é possível verificar que o bloco de aquisição vai escrevendo na região livre do *buffer* e atualizando a posição de escrita enquanto o bloco de processamento vai lendo e processando dados da região ocupada do mesmo atualizando a posição de leitura do *buffer*. Caso a posição de escrita ultrapasse a de leitura, existe perda de dados no *buffer* e uma flag de erro será gerada.

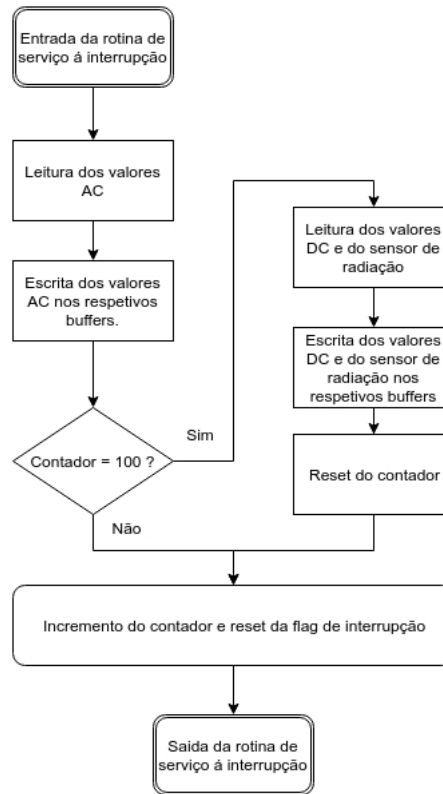


Figura 3.23: Diagrama do código da rotina de serviço a interrupção

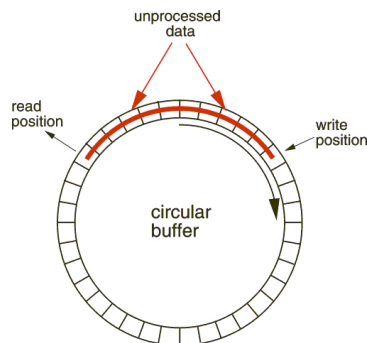


Figura 3.24: Ilustração de um buffer circular (fonte:luaVIEW)

### 3.4.2 PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento dos dados armazenados nos *buffers* circulares é um processo de extrema importância, pois é deste processamento que resultam os dados de monitorização do sistema FV. O diagrama de código responsável pelo processamento dos dados é apresentado na figura 3.25.

O diagrama apresentado na figura 3.25 apresenta-se de uma forma geral dividido em dois ramos principais, um onde são processados os dados referentes às grandezas AC e outro relativamente aos dados DC. No ramo relativo aos sinais AC, os sinais são convertidos usando as formulas 3.8 e 3.9 originando assim respetivamente os valores de tensão e corrente AC. Estes valores são usados para se calcular os somatórios do quadrado da tensão e da corrente, tal como também o somatório da potência instantânea durante um período de 20 amostras. O somatório é realizado durante vinte amostras pois, a uma frequência de amostragem de 1kHz, vinte amostras representam um período completo de um sinal de 50Hz. Finalizado esse somatório, procede-se então ao cálculo da tensão e corrente RMS e das

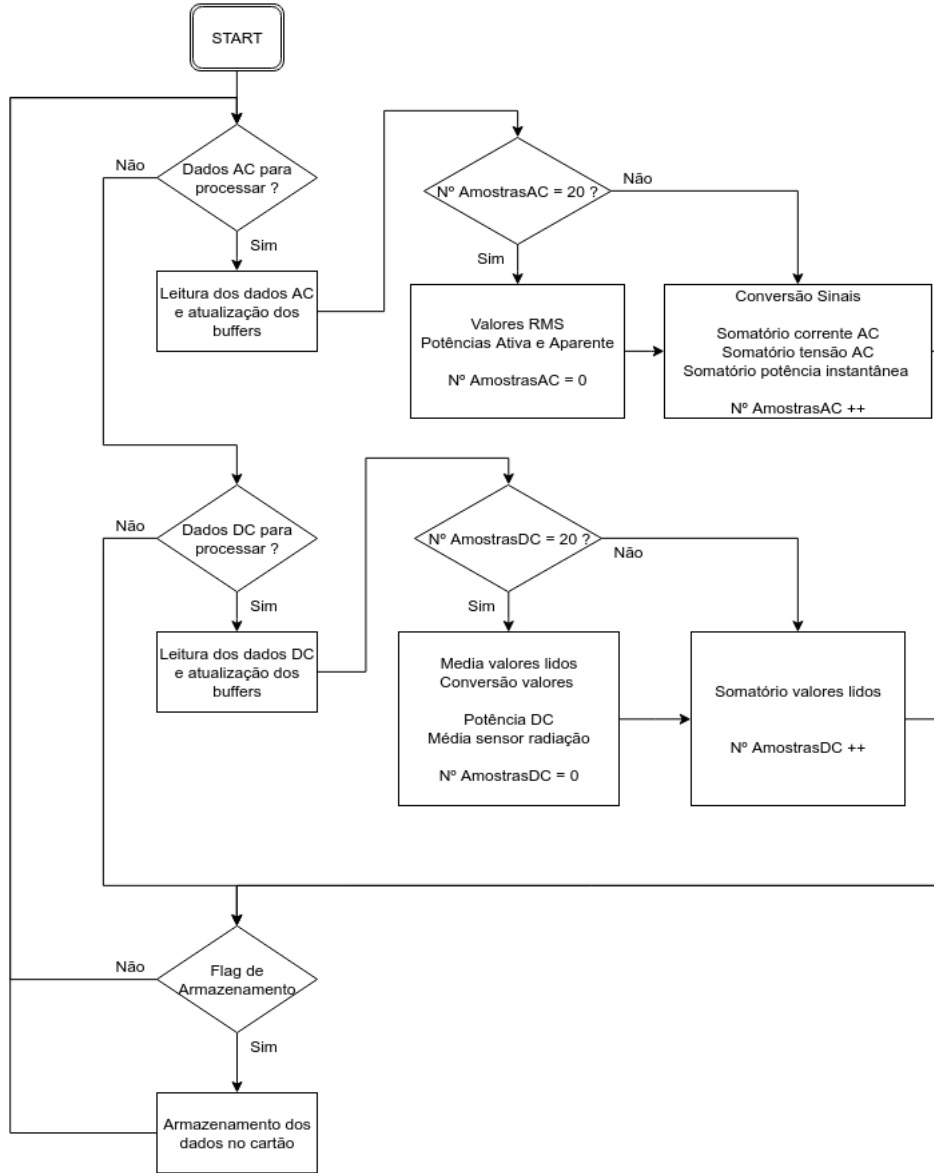


Figura 3.25: Diagrama de código do processamento dos dados.

potências ativa e aparente.

$$V_{ac} = \frac{(V_{vac_{ADC}} - V_{offset_{ADC}}) \times 3.3 \times (R2 + R1)}{1023 \times G_{diff} \times G_{iso} \times R2} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.8)$$

$$I_{ac} = \frac{(V_{iac_{ADC}} - V_{offset_{ADC}}) \times 3.3}{1023 \times sensibilidade} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.9)$$

No ramo dos sinais DC, realiza-se inicialmente um somatório dos valores adquiridos na ADC durante 20 amostras. Completo o somatório calculam-se as médias que depois de convertidas pelas equações 3.10 e 3.11 permitem obter respectivamente os valores de tensão e corrente DC médio. Estes últimos permitem o calculo da potência média DC. Neste último ramo de código é realizado também o somatório e média do valor do sensor de radiação. De notar que no processo descrito neste paragrafo, as vinte amostras não representam o período de um sinal de um sinal AC mas sim um período muito



mais longo pois a frequência de *sampling* dos dados processados é muito menor. A figura 3.26 apresenta os tempos e frequências dos sinais desde que são adquiridos na ADC até que são armazenados.

$$V_{dc} = \frac{V_{dc_{ADC}} \times 3.3 \times (R2 + R1)}{1023 \times G_{diff} \times G_{iso} \times R2} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.10)$$

$$I_{dc} = \frac{(V_{dc_{ADC}} - V_{offset_{ADC}}) \times 3.3}{1023 \times sensibilidade} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.11)$$

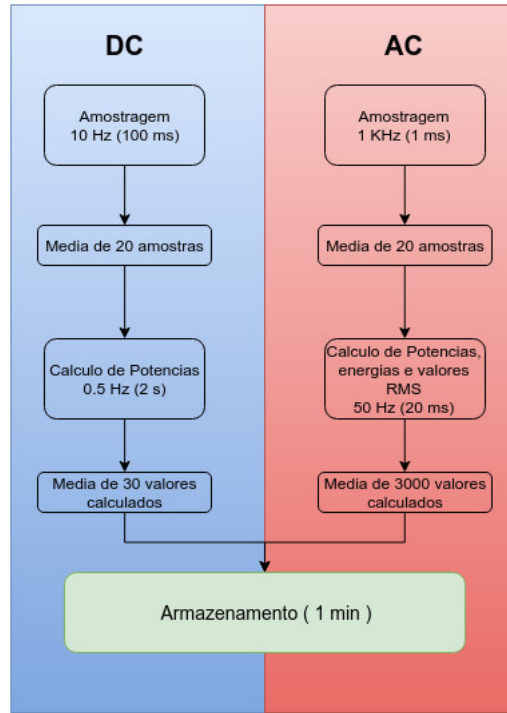


Figura 3.26: Diagrama temporal do sistema

O armazenamento de valores, que ocorre a cada minuto, possui a si associado não só a armazenamento mas também ao calculo das medias de energia com base em referências temporais. É também realizada uma média de todos os valores finais calculados tanto no lado AC como DC nesse circuito sendo que no fim se reinicializam as variáveis que permitem calcular essas mesmo médias.

### 3.4.3 SERVIDOR HTTP

A implementação do servidor HTTP realizou-se recorrendo à *stack* TCP/IP da *Microchip*. Contudo, como o *hardware* escolhido não envolve uma placa de desenvolvimento produzida por uma grande companhia comercial, torna-se necessário adaptar código existente ou escrever de raiz todo o *software*.

Optou-se pela primeira via, usando como base a *Demo App*, que é um projeto que possui a *stack* TCP/IP implementada de uma modo geral, precisando de algumas configurações para a aplicação em que se pretende usar. Procedeu-se então a escolha de uma *Demo* que contivesse já implementada a comunicação com o MOD-ENC624J600 com o objetivo de reduzir o esforço necessário. A escolha incidiu sobre o projeto existente para a placa PIC32-WEB por esta apresentar a referida implementação e por, apesar de a mesma não usar o mesmo microcontrolador que a placa DETPIC32, usar um da mesma família, reduzindo assim o numero de alterações necessárias para se portar o projeto.

Este processo de adaptação contudo, revelou-se bastante complexo e obrigou a extensas modificações no código. Apresenta-se de seguida um breve resumo das alterações efetuadas, encontrando-se uma descrição mais detalhada no anexo A.

A figura 3.27 apresenta de uma forma muito simplificada a implementação do servidor HTTP. Os processos e rotinas que implementam o servidor correm juntamente com o código de processamento de dados no *main code* do projeto. É possível verificar de que forma este se enquadra com o diagrama apresentado na secção anterior.

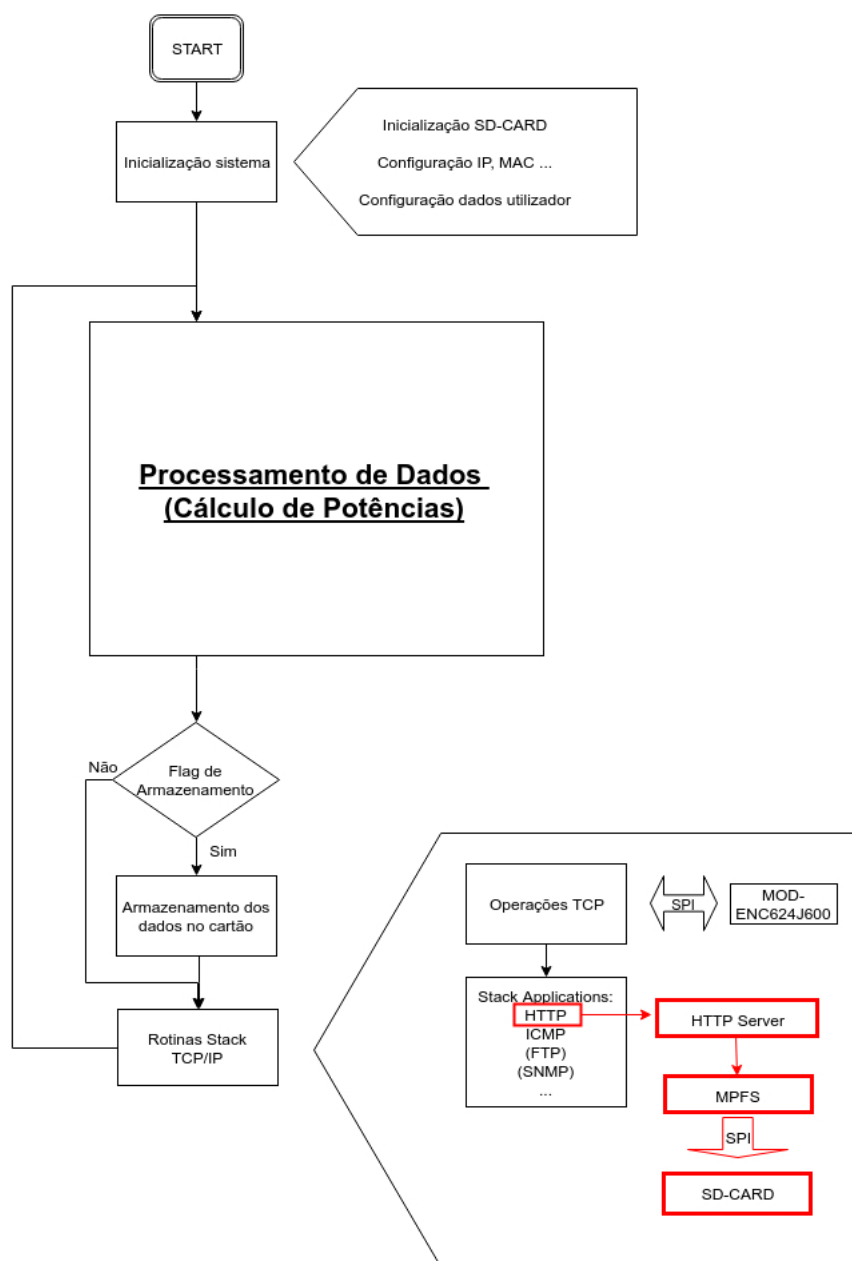


Figura 3.27: Diagrama implementação servidor HTTP

Inicialmente, antes de se iniciar o processamento de dados, e até mesmo do início da aquisição dos mesmos, procede-se às rotinas que inicializam o cartão de memória, validam o seu correto funcionamento e garantem a leitura de dados previamente existentes. É depois efetuada a configuração das informações relativas à interface *ethernet* tal como o IP, o MAC e outros dados relativos ao servidor HTTP. Estes

dados podem estar armazenados no cartão que já foi previamente lido, ou em caso de essa informação não estar disponível recorre-se a valores *default* que são definidos no código.

As rotinas que asseguram o correto funcionamento do servidor encontram-se no final do código, antes de se iniciar um novo ciclo de processamento de dados. Aqui podemos verificar que tais rotinas são divididas em duas operações, uma delas garante as comunicações TCP através da comunicação via SPI com o MOD-ENC624J600 que providência a interface *ethernet* e outra que assegura o processamento do servidor HTTP, ou outro qualquer servidor configurado que esteja disponível na *stack* TCP/IP. A operação que assegura o funcionamento do servidor HTTP acede ao WEBSITE que se encontra num sistema de ficheiros específico e criado pela *microchip*, o MPFS. Este sistema de ficheiros encontra-se armazenado no cartão de memória ao qual o microcontrolador acede via SPI.

Neste caso procedeu-se também à configuração de um servidor ICMP para que consiga verificar a existência de comunicação com placa em caso de mau funcionamento do WEBSITE.

### 3.4.4 BASE DE DADOS

A base de dados do sistema é implementada num cartão de memória. Nele são guardados os dados referentes à configuração da aplicação, bem como ao sistema de ficheiros que contempla a página WEB e os registos de monitorização.

A figura 3.28 apresenta a divisão do cartão de memória bem com um breve descrição sobre cada uma das áreas criadas.

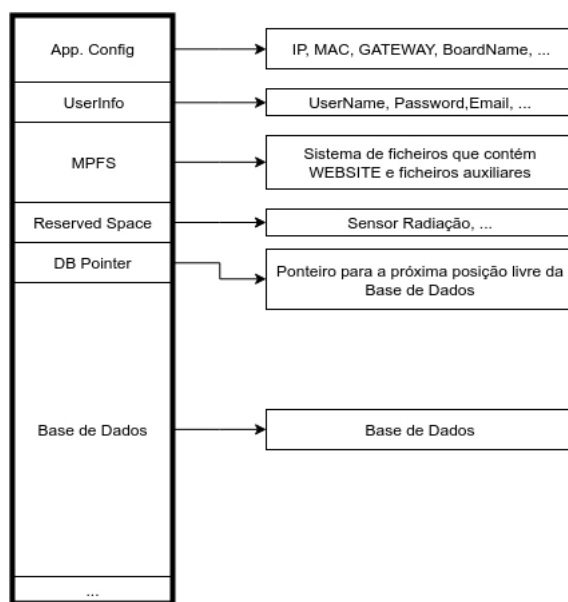


Figura 3.28: Descrição divisão cartão de memória

Os ponteiros para cada uma destas áreas são predefinidos no *logger* por forma a facilitar o acesso localizado a cada uma das mesmas. Caso o cartão esteja vazio, na primeira vez que o código é executado, os campos *App. Config* e *UserInfo* serão preenchidos com informação predefinida. O espaço reservado existente serve para armazenar informações relativas ao sistema que não precisam de histórico, ou seja não há necessidade de armazenar os valores anteriores, como por exemplo o valor atual do sensor de radiação ou até mesmo da temperatura exterior.

A base de dados de monitorização, representada na figura 3.28 como apenas base de dados, contém todas as informações de monitorização armazenadas a cada minuto.

## 3.5 PLATAFORMA WEB

Nesta secção é abordada a implementação da plataforma WEB que permite ao utilizador o controlo e visualização do sistema de monitorização através de qualquer dispositivo que possua um *WEB browser*.

A plataforma WEB tinha sido desenvolvida no projeto anterior. Porém, a estrutura da base de dados foi mantida igual à do ano passado, desta forma, a plataforma WEB é completamente compatível com o sistema desenvolvido este ano. Segue-se uma breve descrição da plataforma WEB existente bem como de algumas das suas funcionalidades.

A página global do sistema, ou página inicial, proporciona ao utilizador uma visão geral sobre o sistema, disponibilizando os dados de monitorização das últimas 24 horas, data e hora atuais bem como possíveis alarmes existentes. A página de configuração por sua vez possibilita ao utilizador efetuar alterações às configurações do servidor e da plataforma, como por exemplo IP, *gateway*, DNS entre outros, para o caso do servidor, e informações como as credenciais de acesso ou até mesmo a data e hora no caso da plataforma WEB. Por último, a página dedicada à gestão de energia onde é possível visualizar gráficos referentes às potências e energias monitorizadas no sistema FV, o utilizador pode escolher entre gráficos diários, mensais ou até mesmo anuais.

Por forma a garantir-se a correta implementação do *webserver* é necessário converter todos os ficheiros associados ao mesmo para um sistema de ficheiros específico, o MPFS. Ao ser feita esta conversão, garante-se que o servidor HTTP, implementado recorrendo a *stack* TCP/IP, vai ser capaz de ler todos os ficheiros necessários para a correta execução da página WEB. Para se proceder à conversão dos ficheiros em causa, usa-se um programa java, fornecido pela própria *Microchip*, programa esse que converte todos os ficheiros referentes ao *webserver* num único ficheiro binário, contendo já todos os ficheiros em *mpfs*. O ficheiro binário deverá depois ser carregado para o cartão de memória para uma zona MPFS previamente definida. Existem várias formas de carregar o ficheiro binário para o cartão SD, cujo os procedimentos se encontram detalhados no Anexo A.

O acesso aos dados da plataforma, dados estes que se encontram no cartão SD, é feito com ações de pedido/resposta entre o cliente e o servidor HTTP. A página WEB invoca funções que são implementadas com ajuda da *stack* TCP/IP e cuja função é enviar, por meio de *strings* a informação pretendida do cartão SD para estruturas de dados dinâmicas. Estas servem de base de informação para as páginas WEB.

As estruturas de dados às quais a plataforma WEB recorre para produzir a sua informação são implementadas recorrendo a ficheiros XML. A escrita e atualização dos valores apresentados nestes mesmos ficheiros é assegurada por funções que correm no microcontrolador, implementadas recorrendo à *stack* TCP/IP e que são invocadas pela página WEB. Estas são responsáveis pela aquisição da informação pretendida por parte da plataforma WEB, lendo a mesma do cartão de memória e escrevendo-a nos ficheiros XML através de comandos TCP.

A figura 3.29 apresenta o ficheiro XML contendo uma das várias estruturas existentes na plataforma.

A plataforma WEB possui ainda funcionalidades por forma a garantir ao utilizador proteção dos conteúdos de monitorização bem como das definições do sistema que podem ser alteradas via

```

-<sensors_samples>
-<x>
  <e>19319321</e>
  <va>229.827</va>
  <ia>30.091</ia>
  <vd>650.606</vd>
  <id>10.729</id>
  <r>3.300</r>
  <pd>6.980</pd>
  <pp>5.974</pp>
  <pq>3.482</pq>
  <ps>6.915</ps>
  <ed>46.417</ed>
  <ep>39.614</ep>
  <eq>12.006</eq>
  <es>45.615</es>
  <s>0</s>
  <m>50</m>
  <h>23</h>
  <d>31</d>
  <mo>12</mo>
  <y>15</y>
</x>

```

Figura 3.29: Ficheiro XML contendo uma das estruturas de dados da plataforma [18]

plataforma. Como tal, o utilizador precisa de introduzir as suas credenciais, nome de utilizador e palavra passe, para poder aceder aos dados de monitorização, pedir a geração de gráficos para datas específicas ou mesmo para alterar dados do sistema. Os últimos contemplam, entre outros, o IP do servidor, nome da placa e credenciais de acesso à plataforma.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os testes de funcionamento dos vários blocos constituintes do sistema de monitorização. Como à data da escrita deste documento ainda não existe prototipagem do circuito, não é possível realizar-se um teste completo ao sistema.

### 4.1 HARDWARE

No âmbito do hardware foi realizado um teste ao único circuito que foi desenvolvido de novo este ano, o de acondicionamento do sinal do sensor de corrente AC.

Por falta de prototipagem do placa, o teste foi realizado gerando sinais sintéticos que simulam o comportamento do sensor, medindo-se a saída do circuito. A tabela 4.1 apresenta o resultados do teste.

	$V_{Máx}$	$V_{Min}$	$\delta V$
Entrada	440 mV	-448 mV	888 mV
Saída	3.08 V	680 mV	2.4 V

Tabela 4.1: Valores sinal entrada e saída do circuito acondicionamento

O circuito de acondicionamento dimensionado aplica ao sinal de entradas um *offset* de 500 mV e um ganho de três. Os valores de erro encontram-se apresentados na tabela 4.2.

	$V_{Máx}$	$V_{Min}$	$\delta V$	<i>offset</i>
Medido	3.08 V	680 mV	2.4 V	1.88 V
Calculado	2.82 V	180 mV	2.66 V	1.5 V
Erro	-0.26 V	-0.5 V	0.22 V	-0.38 V

Tabela 4.2: Valores de Erro

O erro existente deve-se, em parte, do valor de *offset* que, não sendo bastante preciso afeta bastante os resultados do circuito. O valor do ganho apresenta também um pequeno erro, como é possível observar pelo valor do erro de  $\delta V$ , este mesmo erro, contudo, não é o que mais influência nos resultados, além de poder ser compensado por software. Por forma a melhorar os resultados, pode se recorrer ao uso de resistências de precisão no divisor resistivo que gera a tensão de *offset* por forma a que esta se aproxime o máximo possível do valor pretendido.

## 4.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

Cronologicamente, o desenvolvimento do projeto passou inicialmente por implementar o código de análise e processamento de dados na placa DETPIC32, por forma a verificar se a performance do microcontrolador PIC32 era suficiente para processar os dados dos sensores e saber qual a sua capacidade ainda disponível para todas as tarefas de servidor que teria que executar.

Nesta secção são apresentados os testes ao *firmware* implementado responsável pela aquisição e processamento bem como os testes de *performance* do microcontrolador ao executar estas tarefas.

### 4.2.1 VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS

Para realização dos cálculos realizados pelo microcontrolador, introduziram-se sinais sintéticos na entrada dos portos da ADC por forma a simular os sinais vindos dos circuitos de acondicionamento.

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados medidos pelo *firmware*, os valores esperados e o respetivo erro para os valores AC e DC respetivamente.

	Medido	Esperado	Erro
Tensão(RMS)	225 V	224 V	1 V
Corrente(RMS)	47 A	47 A	0 A
Potência ativa	10598 VA	10619 VA	-21 VA
Potência aparente	10620 W	10620 W	0 W

Tabela 4.3: Resultados e erros AC

	Medido	Esperado	Erro
Tensão	938 V	938 V	0 V
Corrente	58 V	58 V	0 V
Potência	54502 W	54436 W	-66 W

Tabela 4.4: Resultados e erros DC

Como estamos a lidar com sinais sintéticos, os resultados encontram-se muito próximos do esperado sendo que, o pouco erro que se apresenta, deve-se apenas a pequenos arredondamentos e de erro introduzido pelas bibliotecas que permitem ao microcontrolador proceder a operações de multiplicação e divisão de variáveis. Visto que a placa em uso não possui uma FPU integrada, os cálculos são executados por *software*, com menor precisão.

### 4.2.2 TESTE DE PERFORMANCE

O teste de performance do sistema tem como objetivo saber a utilização, em percentagem, de processador que é usado pelas rotinas de aquisição e processamento. Este teste tem uma elevada importância para o desenvolvimento do projeto pois caso o uso do microcontrolador se apresentasse em valores muito próximos da sua capacidade máxima de processamento, não seria possível para o mesmo processar ainda todas as rotinas relativas à implementação do servidor HTTP.

Sabendo, a partir de informação apresentada na secção 3.4, que o sistema possui uma rotina de serviço à interrupção que é invocada com uma frequência de 1kHz, a utilização de CPU requerida para o tratamento dos dados dos sensores define-se como o tempo que este último demora para proceder a



aquisição e processamento de todos os sinais do sistema em relação ao intervalo de execução da RSI, ou seja um milissegundo. Para se obter esse mesmo tempo recorreu-se à leitura de valores do *coretimer* do microcontrolador por forma a saber quantos ciclos decorrem entre cada ponto de interesse do código. Esse número de ciclos depois de multiplicado pelo tempo de execução de cada ciclo permite obter um intervalo temporal. O processo de aquisição e respetivos resultados são abaixo apresentados.

Foram medidos separadamente os tempos de aquisição de dados, de somatório para cálculo das médias e de cálculos de potências, energias e valores médios e/ou RMS, tanto para valores AC como para DC.

Por forma a aumentar a confiança nos resultados, apresentam-se valores de 5 corridas diferentes. Entre cada uma delas o microcontrolador foi reiniciado. O resultado de cada corrida apresenta-se como a média ponderada de no mínimo 300 amostras para cada um dos tempos a medir. Através da média das 5 corridas garantimos assim um mínimo de 1500 amostras usadas para fazer a média de cada um dos tempos usados para calcular o tempo de execução total. A tabela 4.5 apresenta os valores de *coretimer* já convertidos neste caso para  $\mu s$ . De notar que se define como máximo aquele em que o microcontrolador tem que fazer a aquisição e processamento, composto pelos somatório e cálculos finais, de todos os sinais AC e DC

Todos os valores de tempo aqui apresentados encontram se em  $\mu s$ .

Tempos	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Media
Aquisição AC	17.407	17.403	17.403	17.404	17.408	17.405
Somatório AC	19.306	19.296	19.295	19.302	19.301	19.300
Cálculos AC	35.061	34.965	35.034	35.043	35.049	35.030
Aquisição DC	25.785	25.787	25.783	25.786	25.772	25.783
Somatório DC	4.130	4.136	4.135	4.136	4.121	4.131
Cálculos DC	39.022	39.022	39.019	39.034	39.038	39.027

Tabela 4.5: Tempos de execução do código ( $\mu s$ )

Da soma de todos os valores médios resultam os seguintes resultados:

$$T_{Máximo} = 17.405 + 19.300 + 35.030 + 25.783 + 4.131 + 39.027 \quad (4.1)$$

$$T_{Máximo} = 140.68 \mu s = 0.14068 ms \quad (4.2)$$

$$\%_{USED} = \frac{0.14068}{1} * 100 = 14.068\% \quad (4.3)$$

Apresentam-se abaixo os mesmos resultados, mas em vez de se usar os tempos médios, usam-se os piores tempos por forma a calcular o uso no pior caso.

Tempos	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Pior Caso
Aquisição AC	17.550	17.550	17.550	17.550	17.550	17.550
Somatório AC	19.775	19.775	19.750	20.225	19.850	20.225
Cálculos AC	35.825	35.800	35.800	35.825	36.000	36.000
Aquisição DC	25.900	25.900	25.900	25.900	25.900	25.900
Somatório DC	4.475	4.550	4.500	4.500	4.575	4.575
Cálculos DC	39.925	39.925	39.925	39.950	39.925	39.950

Tabela 4.6: Tempos de execução do código para o pior caso ( $\mu s$ )

Da soma de todos os valores de pior caso resultam os seguintes resultados:

$$T_{Máximo-PiorCaso} = 17.550 + 20.225 + 36.000 + 25.900 + 4.575 + 39.950 \quad (4.4)$$

$$T_{Máximo-PiorCaso} = 144.20\mu s = 0.14420ms \quad (4.5)$$

$$\%_{USED-PiorCaso} = \frac{0.14420}{1} * 100 = 14.420\% \quad (4.6)$$

Através das equações 4.3 e 4.6 concluí-se que para aquisição e processamento dos sinais usa-se em média 14.068 % e no máximo 14.420 % do microcontrolador. Este valores apresenta-se como bastante baixo, inferior a um quinto da capacidade total, o que revela ainda existir uma grande margem para a implementação de todas as rotinas alusivas a *stack* TCP/IP da microchip.

## 4.3 SERVIDOR WEB

Os testes relativos ao servidor WEB apresentam-se por partes pois servem como forma de verificar o funcionamento de blocos essenciais do mesmo.

### 4.3.1 TESTE DE COMUNICAÇÃO

Além do servidor HTTP, procedeu-se também à implementação de um servidor ICMP por forma a que o comando *ping* permita testar inicialmente a comunicação entre o servidor e um qualquer dispositivo que o utilizador possua, neste caso o computador.

A imagem 4.1 apresenta os resultados do troca de mensagens entre o servidor e o computador bem com o tempo de resposta das mesmas.

A análise da imagem permite verificar que o tempo de resposta do servidor ICMP é superior aos tempos encontrados num servidor tradicional. Esta característica deve-se ao fato das rotinas que implementam o mesmo serem executadas no tempo livre que existe entre o processamento e a aquisição de dados, sendo a prestação dos servidores penalizada em sacrifício de cumprimento dos tempos de aquisição e processamento exigidos ao sistema.

```

PING 169.254.1.1 (169.254.1.1) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 169.254.1.1: icmp_seq=1 ttl=100 time=2.51 ms
64 bytes from 169.254.1.1: icmp_seq=2 ttl=100 time=1.32 ms
64 bytes from 169.254.1.1: icmp_seq=3 ttl=100 time=2.26 ms
64 bytes from 169.254.1.1: icmp_seq=4 ttl=100 time=1.34 ms
^C
--- 169.254.1.1 ping statistics ---
4 packets transmitted, 4 received, 0% packet loss, time 3004ms
rtt min/avg/max/mdev = 1.327/1.863/2.512/0.534 ms

```

Figura 4.1: Resultados teste de comunicação

### 4.3.2 TESTE FUNCIONAMENTO

O teste relativo ao funcionamento do servidor realizou-se carregando o WEBSITE no seu formato binário para o cartão de memória e pela tentativa de acesso ao WEBSITE a partir do servidor, o WEBSITE apresenta-se funcional e aceita as credenciais de acesso ao sistema. Contudo o *webserver* apresenta algumas falhas que são relatadas na secção seguinte.

## 4.4 SISTEMA GLOBAL

Do teste realizado ao sistema completo, recorrendo a valores sintéticos nas entradas da ADC do microcontrolador devido a ainda inexistência de um protótipo da placa, revelou várias particularidades que são abaixo apresentadas.

O sistema procede à aquisição e processamento de sinais vindos da ADC e produz resultados de acordo com o esperado, sendo estes corretamente armazenados no cartão de memória. A tabela 4.7 apresenta os valores que estão a ser armazenados e é possível verificar a correção dos mesmos, pois para os mesmos sinais sintéticos usados para os testes da secção 4.2.1, são armazenados os mesmos valores lá calculados. O WEBSITE por sua vez encontra-se a numa primeira instância em que o *login* é assegurado de forma correta e a página de configurações do sistema encontra-se funcional, ou seja, permite ler e alterar os dados relativos a configuração do sistema e do *webserver*. Contudo, a estrutura dinâmica de dados da página WEB, que é atualizada por funções implementadas no microcontrolador e que antecede esta dissertação, não se encontra funcional, de forma a que o WEBSITE apresenta sempre os mesmo dados com que as estruturas dinâmicas são inicializadas e quando dela se exigem uma atualização o código do microcontrolador revela variadas anomalias e deixa de funcionar.

Address	V(RMS)	I(RMS)	V(DC)	I(DC)	P(DC)	PP	PS
1180	225 V	47 A	938 V	58 A	54502 W	10598 VA	10620 W

Tabela 4.7: Dados escritos no cartão de memória ( $\mu s$ )

Sendo que os dados estão a ser corretamente armazenados no cartão de memória, como acima validado, as rotinas presentes no ficheiro *CostumHTTPApp.c* e que são responsáveis pela leitura de informações no cartão de memória e escrita das mesmas nas estruturas dinâmicas, que neste caso são os ficheiros XML, provam não estar a funcionar corretamente, necessitando como tal de serem revistas.



# CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

---

O trabalho proposto nesta dissertação tem como objetivo implementar um sistema de monitorização usando como base de referência o projeto já existente do ano anterior. Foi feita uma revisão ao *hardware* desenvolvido no ano anterior e substituído o circuito de condicionamento do sinal do sensor de corrente AC por forma a corrigir um problema de *offset* variável existente no anterior. Testes realizados ao novo circuito desenvolvido revelam que este mantém o *offset* fixo, anulando assim o problema anteriormente existente.

Devido às dificuldades existentes com placa de desenvolvimento do ano anterior, esta última foi substituída pelo conjunto DETPIC32 com o MOD-ENC624J600. Este conjunto requereu a implementação de uma versão da *stack* TCP/IP da *Microchip* personalizada para esta placa, o que levou a extensas alterações à mesma. Foi como tal desenvolvida uma nova implementação do servidor HTTP, bem como de *firmware* responsável pela aquisição e processamento de dados, dados estes que são corretamente guardados no cartão de memória. Contudo, a plataforma WEB manteve-se a do ano anterior e a atualização das estruturas dinâmicas da mesma com base em dados do cartão de memória é uma valência que continua a requerer mais atenção no futuro. Conclui-se então que neste momento existe já uma plataforma com capacidade de processamento de memória RAM capaz de todas as rotinas atualmente implementadas bem como de futuro código que possa vir a implementar para acrescentar valências como envio de alertas por email, entre outras. A exceção da estrutura de dados, o WEBSITE apresenta-se plenamente funcional e a correr sem outros problemas no servidor HTTP.

## 5.1 TRABALHO FUTURO

Como trabalho futuro para este projeto propõe-se a revisão das rotinas que fazem a ponte entre o cartão de memória e as estruturas dinâmicas do WEBSITE, por forma a tornar o projeto 100% funcional. É possível ainda a implementação de alertas via email, pois agora já existe *hardware* como capacidade para lidar com as chaves de encriptação dos emails. Sugere-se ainda a possibilidade de implementação de um RTC por software que apenas recorra ao RTC físico em intervalos de tempo

espaçados por forma a evitar constates leituras ao mesmo, o que atrasa o comportamento do sistema. Por ultimo é possível implementar rotinas de pré-processamento de dados mensais e até mesmo anuais, usando se necessário um maior cartão de memória, para que quando estes forem pedidos pelo utilizador ao WEBSITE o microcontrolador não tenha que processar uma enorme quantidade de informação o que atrasa a resposta do WEBSITE ao pedido do utilizador.

Já na reta final da dissertação, notou-se que, com a implementação do novo circuito de acondicionamento do sinal do sensor de corrente AC, introduziu-se um novo elemento, o regulador de tensão de referência. Ao usar-se um regulador de tensão de referência para gerar a tensão de *offset* para o circuito da corrente AC é possível também gerar, recorrendo eletrónica elementar, todas as restantes tensões de *offset* necessárias para o circuito, evitando assim uso de díodos *zener* extra para o caso. Sugere-se então a substituição das partes do circuito responsáveis pela geração das tensões de referência que servem de tensões de *offset* para os 3 circuitos de condicionamento por uma solução única, cujo circuito tipo se encontra no Anexo B.

# REFERÊNCIAS

---

- [1] Shifter, *Durante 4 dias, Portugal só consumiu energia renovável*, <http://shifter.pt/2016/05/durante-4-dias-portugal-so-consumiu-energia-renovavel>, Artigo, [Online; accessed 06-06-2016].
- [2] D. G. de Energia e Geologia, *Renováveis Estatísticas Rápidas nº137*, Relatório, [Online; accessed 05-06-2016].
- [3] M. H. Rashid, *Power electronics handbook: devices, circuits and applications*. Academic press, 2010.
- [4] J. Keirstead, «Behavioural responses to photovoltaic systems in the uk domestic sector», *Energy Policy*, vol. 35, nº 8, pp. 4128–4141, 2007.
- [5] SMA, *Sunny boy 3000tl datasheet*, [Online; accessed 29-05-2016]. endereço: <http://files.sma.de/dl/15330/SB5000TL-21-DEN1551-V20web.pdf>.
- [6] —, *Sunny boy 240-us datasheet*, [Online; accessed 29-05-2016]. endereço: [http://www.proinso.net/pub/doc/File/eeuu/Sunny\\_Boy\\_240\\_US.pdf](http://www.proinso.net/pub/doc/File/eeuu/Sunny_Boy_240_US.pdf).
- [7] KACO, *Kaco blueplanet 5.0tl3 datasheet*, [Online; accessed 29-05-2016]. endereço: [http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/blueplanet\\_5.0-9.0\\_TL3/Data\\_Sheets/DTS\\_bp\\_5-9\\_TL3\\_en\\_150928.pdf](http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/blueplanet_5.0-9.0_TL3/Data_Sheets/DTS_bp_5-9_TL3_en_150928.pdf).
- [8] —, *Kaco blueplanet 250 datasheet*, [Online; accessed 28-06-2015]. endereço: [http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/Ultraverter\\_system/Data\\_Sheets/DTS\\_bp\\_ultraverter\\_system\\_en.pdf](http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/Ultraverter_system/Data_Sheets/DTS_bp_ultraverter_system_en.pdf).
- [9] ABB, *Abb string inverters pvi-3.0/3.6/4.2-tl-outd 3 to 4.2 kw*, [Online; accessed 29-05-2016], 2016. endereço: [https://library.e.abb.com/public/d7fbc1a4f867107785257e1b0073cc6a/PVI-3.0-3.6-4.2\\_BCD.00374\\_EN\\_RevA.pdf](https://library.e.abb.com/public/d7fbc1a4f867107785257e1b0073cc6a/PVI-3.0-3.6-4.2_BCD.00374_EN_RevA.pdf).
- [10] SMA, *Sunny tripower 10000 tl datasheet*, [Online; accessed 29-05-2016], 2015. endereço: [http://www.gehrlicher.com/fileadmin/content/pdfs/en/wechselrichter/SMA\\_Tripower\\_en.pdf](http://www.gehrlicher.com/fileadmin/content/pdfs/en/wechselrichter/SMA_Tripower_en.pdf).
- [11] —, *Sunny tripower 25000tl datasheet*, [Online; accessed 29-05-2016]. endereço: <http://www.koraxsolar.com/letoltes/inverterek/adatlapok/SMA%20Tripower%2020000-25000TL.pdf>.
- [12] KACO, *Powador 60.0 datasheet*, [Online; accessed 29-05-2016]. endereço: [http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/TL3\\_Inverters\\_Powador\\_30.0\\_TL3-\\_60.0\\_TL3/Data%20Sheets/DTS\\_PW\\_30-60\\_TL3\\_en.pdf](http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/TL3_Inverters_Powador_30.0_TL3-_60.0_TL3/Data%20Sheets/DTS_PW_30-60_TL3_en.pdf).
- [13] —, *Kaco powador 14.0tl3 datasheet*, [Online; accessed 29-05-2016]. endereço: [http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/TL3\\_Inverters\\_Powador\\_9.0\\_TL3-\\_20.0\\_TL3/Data%20Sheets/DTS\\_PW\\_12-20\\_TL3\\_en\\_150928.pdf](http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/TL3_Inverters_Powador_9.0_TL3-_20.0_TL3/Data%20Sheets/DTS_PW_12-20_TL3_en_150928.pdf).

- [14] ABB, *Abb string inverters pvi-5000/6000-tl-outd 5 to 6 kw*, [Online; accessed 29-05-2016], 2016. endereço: [https://library.e.abb.com/public/0b896795ae9fc65685257e1b007478f5/PVI-5000-6000\\_BCD.00375\\_EN\\_RevA.pdf](https://library.e.abb.com/public/0b896795ae9fc65685257e1b007478f5/PVI-5000-6000_BCD.00375_EN_RevA.pdf).
- [15] A. Woyte, M. Richter, D. Moser, S. Mau, N. Reich e U. Jahn, «Monitoring of photovoltaic systems: good practices and systematic analysis», em *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2013, pp. 3686–3694.
- [16] J. N. Mayer, D. S. Philipps, N. S. Hussein, D. T. Schlegl e C. Senkpiel, *Current and future cost of photovoltaics*, Estudo.
- [17] G. Blaesser e D. Munro, «Guidelines for the assessment of photovoltaic plants document a photovoltaic system monitoring», *Joint Research Centre, Ispra, Italy, EUR 16338 EN, Issue 4.2*, 1995.
- [18] P. E. dos Santos Freire, «Logger solar independente de inversor», Msc, DETI-UA, 2015.
- [19] GreenEnergyOptions, *Chorus pv display user manual*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: <http://www.geotogether.com/wp-content/uploads/2015/10/Chorus-PV-User-manual.pdf>.
- [20] OpenEnergyMonitor, *Emon*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: <http://openenergymonitor.org/emon/>.
- [21] ACKSEN, *Electrocorder datasheet*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: <http://www.electrocorder.com/Portals/0/product-datasheets/PV-3/PV-3-DS-En.pdf>.
- [22] Caresolar, *Innovative data logger for pv monitoring*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: [http://www.caresolar.de/download/broschuere\\_e\\_en.pdf](http://www.caresolar.de/download/broschuere_e_en.pdf).
- [23] Energeno, *Wattson solar plus user manual*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: <http://www.manualslib.com/manual/935695/Wattson-Solar-Plus.html#manual>.
- [24] OWL, *Getting started with intuition-pv*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: <http://docs.owlintuition.com/index.php?m=2>.
- [25] S. Log, *User manual*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: <http://www.solar-log.com/en/products-solutions/solar-log-2000/downloads.html>.
- [26] B. Standard et al., «Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis», *BS EN*, vol. 61724, 1998.
- [27] C. W. Thurston, *Monitoring and data logging services multiply*, [Online; accessed 24-05-2015]. endereço: [http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/monitoring-and-data-logging-services-multiply\\_100015232/618/#axzz3bLpmx6kE](http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/monitoring-and-data-logging-services-multiply_100015232/618/#axzz3bLpmx6kE).
- [28] C. Brehaut, *Global pv monitoring: technologies, markets and leading players, 2014-2018*, [Online; accessed 06-06-2016]. endereço: <http://www.greentechmedia.com/research/report/global-pv-monitoring-technologies-markets-and-leading-players-2014-2018>.
- [29] H. G. Beyer, J. Betcke, A. Drews, D. Heinemann, E. Lorenz, G. Heilscher e S. Bofinger, «Identification of a general model for the mpp performance of pv-modules for the application in a procedure for the performance check of grid connected systems», em *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France*, vol. 7, 2004, p. 2004.
- [30] A. Skartveit, J. A. Olseth e M. E. Tuft, «An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo», *Solar Energy*, vol. 63, n° 3, pp. 173–183, 1998.
- [31] A. Drews, A. De Keizer, H. Beyer, E. Lorenz, J. Betcke, W. Van Sark, W. Heydenreich, E. Wiemken, S. Stettler, P. Toggweiler et al., «Monitoring and remote failure detection of grid-connected pv systems based on satellite observations», *Solar Energy*, vol. 81, n° 4, pp. 548–564, 2007.



- [32] S. Edwards, D. Bobick e S. Weinzierl, «Impact of harmonic current on energy meter calibration», em *Energytech, 2011 IEEE*, IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [33] J. L. Afonso, R. G. Pregitzer, J. Pinto, L. F. Monteiro, P. Neves, R. Alves, D. Gonçalves, J. Cunha, J. Batista, J. S. Martins et al., «Sinus: tecnologia para monitorização da qualidade de energia, compensação dinâmica de harmónicos, factor de potência e desequilíbrios e para interface de fontes renováveis», 2007.
- [34] W. M. Grady e S. Santoso, «Understanding power system harmonics», *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, nº 11, pp. 8–11, 2001.
- [35] A. Sharma, V. Nayyar, S. Chatterji e R. T. P. Lehana, «Pic microcontroller based svc for reactive power compensation and power factor correction», *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, nº 9, 2013.
- [36] B. C. Kok, E. Kan, C. Uttraphan e H. H. Goh, «A conceptual design of microcontroller-based power factor corrector circuit.», 2009.
- [37] M. Dimitrijević e V. Litovski, «Quantitative analysis of reactive power calculations for small non-linear loads», em *Small System Simulation Symposium*, 2012, pp. 150–154.
- [38] E. Moulin, S. d Electricite e S. Dictionary, «Measuring reactive power in energy meters», *Metering International*, vol. 1, nº 1, pp. 52–54, 2002.
- [39] O. Krejcar e R. Frischer, «Real time voltage and current phase shift analyzer for power saving applications», *Sensors*, vol. 12, nº 8, pp. 11 391–11 405, 2012.
- [40] L. Czarnecki, «Budeanu and fryze: two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents», *Electrical Engineering*, vol. 80, nº 6, pp. 359–367, 1997.
- [41] J. L. Willems, «The iee standard 1459: what and why?», em *Applied Measurements For Power Systems (AMPS), 2010 IEEE International Workshop on*, IEEE, 2010, pp. 41–46.
- [42] M. Schulz, «A progressive way to integrate current measurement into modern power electronic systems», em *Conference Proceedings PCIM2008, Nuremberg*, 2008.
- [43] D. P. McNutt, «Electrical current sensors», *Chemical Rubber Co*, 1997.
- [44] J. Fraden, «Handbook of modern sensors», 2010.
- [45] R. Nilsson, *Circuitos Eléctricos*. 2008.
- [46] ElectronicsTutorials, *Current transformer basics*, [Online; accessed 23-05-2015]. endereço: <http://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html>.
- [47] Honeywell, *Hall effect sensing and application*, [Online; accessed 20-04-2015]. endereço: [http://sensing.honeywell.com/index.php?ci\\_id=47847](http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847).
- [48] A. TECHNOLOGIES, *Acpl-790b, acpl-790a, acpl-7900 datasheet*, [Online; accessed 28-05-2016]. endereço: <http://docs.avagotech.com/docs/pub-005417>.
- [49] D. P. L. Par Dr. Joachim Schmid, *Measurement of current and voltage in mv and hv switch-gears with low power instrument transformers*, [Online; accessed 28-05-2016], 2003. endereço: [http://2003.matpost.org/matpostcd/www/pdf/Textes/MT/MT4/Article%20M%2041\\_P.%20LEQUITTE.pdf](http://2003.matpost.org/matpostcd/www/pdf/Textes/MT/MT4/Article%20M%2041_P.%20LEQUITTE.pdf).
- [50] ABB. (2016). Current sensors voltage sensors. [Online; accessed 28-05-2016], endereço: [http://www02.abb.com/global/atabb/atabb104.nsf/0/4b9d658ae545650dc1257475002cd988/\\$file/Elektronische\\_Strom\\_Spannungswandler.pdf](http://www02.abb.com/global/atabb/atabb104.nsf/0/4b9d658ae545650dc1257475002cd988/$file/Elektronische_Strom_Spannungswandler.pdf).

- [51] J. Meydbray, K. Emery e S. Kurtz, *Pyranometers and Reference Cells, What's the Difference?*, Preprint, [Online; accessed 28-05-2016].
- [52] L. Dunn, M. Gostein e K. Emery, «Comparison of pyranometers vs. pv reference cells for evaluation of pv array performance», em *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, IEEE, 2012, pp. 002 899–002 904.
- [53] H. Holt, «A deeper look into difference amplifiers», *Analogue Dialogue*, vol. 48, 2014.
- [54] REN, *Relatório de qualidade do serviço*, Relatório, [Online; accessed 30-05-2016], 2014.
- [55] T. Instruments, *TL43xx Precision Programmable Reference*, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>, Datasheet, [Online; accessed 30-05-2016], 2015.
- [56] Coilcraft, *CS60 series*, <http://www.farnell.com/datasheets/1870393.pdf>, Datasheet, [Online; accessed 31-05-2016], 2015.
- [57] L. Technology, *The Mini SD card module Micro SD card module*, [http://www.chinalctech.com/index.php?\\_m=mod\\_product&\\_a=view&p\\_id=646](http://www.chinalctech.com/index.php?_m=mod_product&_a=view&p_id=646), Product Info, [Online; accessed 09-07-2016].

# ANEXO A: DOCUMENTAÇÃO

---

## INTRODUÇÃO

O presente documento serve como documentação de apoio ao *software* desenvolvido na dissertação *Logger Solar com Controlo de Produção*. O projeto foi desenvolvido recorrendo ao IDE *MPLAB* e usa a *stack* TCP/IP da microchip como biblioteca principal para implementar as funcionalidades WEB pretendidas.

O código base do projeto foi a *Demo App* existente para a placa PIC32-WEB desenvolvida pela OLIMEX, pois esta já contém em si implementadas as rotinas de comunicação com o MOD-ENC624J600 via SPI. A esta *Demo App* foi acrescentado código e alterado parte do existente.

## ORGANIZAÇÃO GERAL DO PROJETO

O projeto encontra-se ramificado em variados ficheiros e bibliotecas, sendo que a sua execução depende da configuração realizada sobre as várias valências que a *stack* TCP/IP possibilita.

O código principal, que corre no ficheiro *Main.c*, invoca funções de configuração, inicialização e execução das rotinas da *stack* TCP/IP. É neste ficheiro que corre o *loop* principal onde decorrem todos os cálculos relativos ao processamento dos dados de monitorização. Na ISR ocorrem as conversões da ADC de forma a garantir uma correta frequência de *sampling*. Não se pode retirar as ISR do *Main.c* para outro ficheiro sob pena de estas executarem de uma forma muito mais lenta e como tal afetarem o correto funcionamento do código.

## CONFIGURAÇÕES

O ficheiro *TCPIP OLIMEX\_PIC32-WEB.h* contém os *defines* que permitem configurar as funcionalidades a usar. Neste ficheiro podemos verificar que se encontra definido o servidor HTTP2, para implementação da plataforma WEB, e o servidor ICMP, para se poder realizar testes de comunicação com o servidor em caso de mal funcionamento. Existem ainda, no início do ficheiro, *defines* que permitem fazer *debug* de variados pontos críticos do código.

A figura 1 apresenta a relação entre os *defines* criados e o que representam no código. Como o código executado ao usar-se alguns destes *defines* contém comandos *printf*, comandos estes que são

pesados e complexos para o PIC32 processar, estes mesmos podem afetar o correto funcionamento do código, e como tal, afetar a validade dos resultados energéticos apresentados.

PRINT_MAIN	Debug funções críticas do código principal
PRINT_SD_SPI	Debug comandos SPI de comunicação com cartão SD
IMPPOTAC	Impressão valores de Potências AC calculados
IMPRMS	Impressão valores Tensão e Corrente RMS calculados
IMPDC	Impressão valores Tensão e Corrente DC calculados
TEMPCONVAC	Impressão dos tempos de leitura AC no ADC (coretimer)
TEMPCONVDC	Impressão dos tempos de leitura DC no ADC (coretimer)
POTDC	Impressão tempos de calculo Potências DC (coretimer)
POTAC	Impressão tempos de calculo Potências AC (coretimer)
SOMAC	Impressão tempos de somatório AC (coretimer)
SOMDC	Impressão tempos de somatório DC (coretimer)
IMPSAVE	Impressão dos valores a escrever no cartão SD

Figura 1: Relação entre defines e suas funções de Debug

No que às configurações de *hardware* diz respeito, o ficheiro *HWP OLIMEX\_PIC32-WEB.h* contém as configurações dos portos que são usados para comunicações via SPI quer com o MOD-ENC624J600 quer com o cartão SD, em caso de alteração futura dos portos a usar para estas mesmas comunicações, basta alterar os *defines*, mantendo as *MACROS*, e tudo deverá funcionar corretamente.

## CÓDIGO PRINCIPAL

O código principal a correr no ficheiro *Main.c* invoca diversas funções relativas à *stack* TCP/IP e ao código responsável pelo calculo dos valores de monitorização, entre as quais se destacam as seguintes:

***initBuffer();*** Inicialização das estruturas de dados relativas ao *firmware* de calculo dos valores de monitorização.

***InitializeBoard();*** Configuração da comunicação com o MOD-ENC624J600 e rotinas de inicialização do cartão SD. Esta função invoca a função *SDWInit();* que permite saber o total de setores do cartão.

***TickInit();*** Inicializa o módulo Tick que é usado pelas rotinas TCP como base temporal para comunicações do servidor. Este módulo configura e usa o TIMER1 do microcontrolador, pelo o TIMER1 não deve de ser usado para outras finalidades no projeto.

***MPFSInit();*** Inicializa o módulo MPFS, aqui não se inicializa a comunicação com o cartão SD pois essa mesma já foi realizada pela função *SDWInit();*

***InitAppConfig();*** Inicializa a estrutura de dados que contém toda a informação referente à comunicação do servidor, como IP, MAC, MASK, entre outros. A *AppConfig* é uma estrutura de dados que contem toda a informação relativamente as configurações gerais de comunicação. Quando se corre a função *InitAppConfig();*, esta procura pela informação no cartão SD e carrega-a para a estrutura de dados, caso esta não exista no cartão, a informação é lida do ficheiro *TCP/IP OLIMEX\_PIC32-WEB.h*, guardada na estrutura *AppConfig* e escrita no cartão de memória. Caso a escrita no cartão SD não esteja a ser realizada de forma correta, o código por ficar retido nesta função num ciclo infinito, este erro pode ser detetado caso se use na configuração o *define* PRINT\_MAIN.

***StackInit()***; Inicializa as funcionalidades da *stack* TCP/IP configuradas, ou seja, neste caso o servidor HTTP. Este é um ponto crítico do código pois caso existam problemas na comunicação com o MOD-ENC624J600, a função *MACInit()* não vai correr até ao fim ficando aqui o código parado. Em caso de maus contactos ou até mesmo de alimentação insuficiente do MOD-ENC624J600, o programa vai aqui parar, pois este tenta comunicar com o MOD-ENC624J600 forçando um *reset* ao mesmo. Pode-se considerar este como um ponto de validação da comunicação entre a DETPIC32 e o MOD-ENC624J600.

***configuraADC()***; Configura a ADC da placa de acordo com as especificações pretendidas e define quais os portos vão ser usados pelo mesmo.

***configuraTIMERS()***; Configura os TIMERS 2 e 3 para garantir os requisitos temporais de aquisição dados e de armazenamentos dos mesmos no cartão SD. Esta função não pode ser invocada mais cedo no código pois a ISR do TIMER3 a correr a uma frequência de 1kHz interfere nas funções de configuração e inicialização acima descritas levando, entre outros, a erros de inicialização no cartão SD.

***StackTask()***; Verifica a chegada de novos pacotes, identifica o tipo dos mesmo e quais as funções indicadas para os processar. Esta função tem que ser executada periodicamente por forma a garantir o correto funcionamento da *stack*

***StackApplications()***; Invoca as funções principais que implementam os servidos da *stack* configurados, neste caso invoca as funções que garantem o correto funcionamento do servidor HTTP. Tal como a função anterior, deve de ser invocada periodicamente por forma a garantir o correto funcionamento da *stack*.

## IMPORTANTE

É possível encontrar-se código alusivo a leituras da ADC para uma variável de nome *pot*, código este que está comentado. Este código deve de ser ignorado pois diz respeito a um potenciômetro que se encontrava incluído na placa de desenvolvimento do no projeto anterior e cujo valor afetava todas as leituras feitas na ADC.

O projeto contempla código capaz de verificar a perda de informação nos *buffers* circulares que o mesmo possui, ou seja, quando o ponteiro de escrita ultrapassou o de leitura, neste caso é feita uma impressão para o terminal, esta ocorrência não deve de ser ignorada pois representa a perda de valores e consequente perda de robustez dos resultados de monitorização calculados.

Os comandos *itoa*, *btoa*, *ultoa* entre outros do mesmo grupo que convertem para ASCII valores em diversos tipo de variáveis, variam na sua invocação dependendo do compilador usado, sendo que a ordem de passagem de parâmetros nem sempre é a mesma. Caso se use uma versão diferente da 1.20 do XC32 deve de se verificar o correto funcionamento das mesmas.

A função *GenerateRandomDWORD*, invocada enumeras vezes ao longo do código, usava leituras da ADC para obter valores *random*, valores estes que eram usados entre outros para evitar colisões nas comunicações TCP. Como além de usar a ADC, esta função também alterava configuração do mesmo, levava ao incorreto funcionamento da ADC na ISR responsável pela aquisição dos sinais analógicos. Como tal, esta função foi alterada e em vez de recorrer a leituras da ADC, recorre agora a leituras do *coretimer* nos bits menos significativos do mesmo.

## MOD-ENC624J600

A comunicação via *ethernet* é assegurada através do MOD-ENC624J600. A figura 2 apresenta o esquema de ligações entre o MOD-ENC624J600 e a DETPIC32, apresentando ainda a descrição dos pinos da ficha do MOD-ENC624J600.

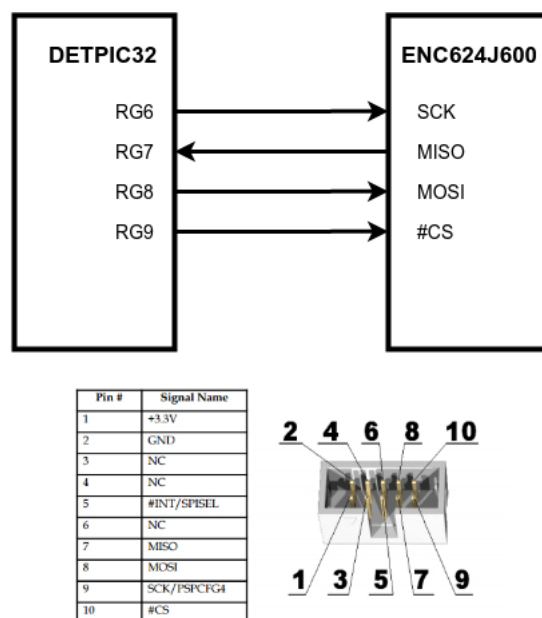


Figura 2: Esquema de ligações entre DETPIC32 e MOD-ENC624J600 e legenda dos pinos de ligação do ultimo.

Na configuração dos portos de comunicação SPI, presente no ficheiro *HWP OLIMEX\_PIC32-WEB.h*, foram desabilitadas as valências relacionadas com sinais de POR, que estão relacionados com poupança de energia.

Apesar de no manual do MOD-ENC624J600 se referir que não é necessário usar uma ligação específica para o *chip select* (CH) podendo este ser ligado aos 3.3V, a verdade é que pelo menos no modo de comunicação via SPI é indispensável, pois o *reset* é feito colando a entrada CS em *off* e enviando para o MOSI uma sequência específica de bits.

No que a rotinas e bibliotecas que garantem a comunicação entre a DETPIC32 e o MOD-ENC624J600 diz respeito, a *DemoApp* já possui tudo implementado e funcional.

## CARTÃO SD

As iterações com o cartão SD, quer para leitura quer para escrita de informação, representam os processos mais complexos implementados na *Demo App*. Como o código base existente na mesma apenas possibilita armazenamento de dados ou na EEPROM do microcontrolador, ou então via SPI em memórias flash muito específicas e produzidas pela microchip, levantou-se o problema da implementação de rotinas que permitissem, via SPI, a iteração com cartões de memória SD.

Recorreu-se então às bibliotecas MDD File System, da microchip, e SD\_Wrapper, da Olimex, para garantir respetivamente a correta leitura e escrita com o cartão SD bem como a manipulação dos ficheiros a serem lido ou escritos no mesmo.

A figura 3 apresenta a forma como as várias bibliotecas interagem entre si, bem como os ficheiros que as representam no projeto do MPLAB.

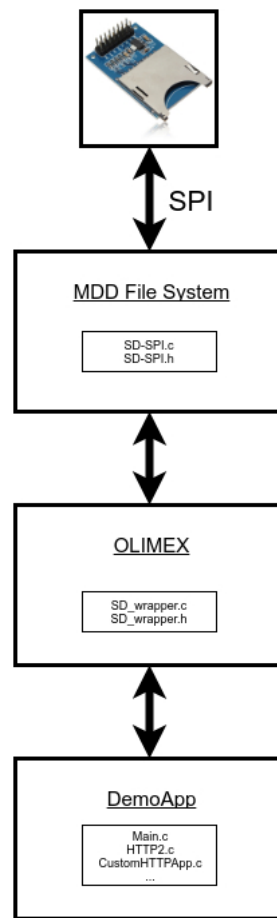


Figura 3: Bibliotecas e funções de comunicação com o cartão SD via SPI.

As ligações entre a DETPIC32 e a interface do cartão SD estão representadas na figura 4

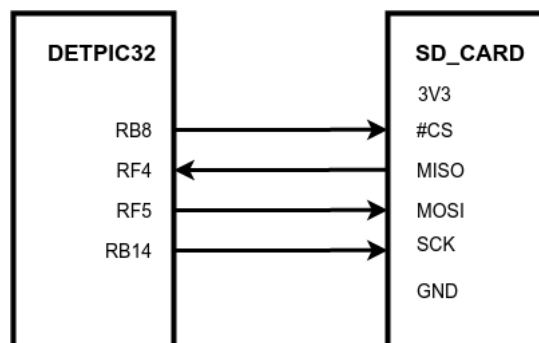


Figura 4: Esquema ligações SD Card e DETPIC32.

A implementação das bibliotecas obrigou a criar desenvolver bastante código por forma a garantir que onde se lê ou escreve na EEPROM ou memória flash, exista também a possibilidade de ler ou escrever no cartão SD. Foi criada a marco MPFS\_USE\_SD para que possa ser acrescentada às zonas de código que já continham as marcos MPFS\_USE\_EEPROM e MPFS\_USE\_SPIFLASH. A parte mais delicada da implementação das rotinas de leitura e escrita no cartão SD passou pela

implementação destas mesmas em todos os locais onde existia inicialmente rotinas para comunicar quer com a EEPROM ou com a memória flash. Foi necessário implementar essas rotinas de forma a que substituam na íntegra as funções de acesso a EEPROM ou a memória flash para que o servidor proceda ao uso do cartão de memória da mesma forma que usaria a EEPROM ou a memória flash. A figura 5 apresenta algumas dessas implementações.

```
#if defined(MPFS_USE_EEPROM)
// Set FAT pic for writing
MPFSStubs[0].addr = 0;
MPFSStubs[0].fatID = 0xffff;
MPFSStubs[0].bytesRem = MPFS_WRITE_PAGE_SIZE - ( ((BYTE)MPFSStubs[0].addr+MPFS_HEAD) & (MPFS_WRITE_PAGE_SIZE-1) );

// Set up EEPROM for writing
if( XEEBeginWrite(MPFSStubs[0].addr+MPFS_HEAD) == XEE_SUCCESS )
    return 0x00;

return MPFS_INVALID_HANDLE;
#elif defined(MPFS_USE_SPI_FLASH)
// Set up SPI Flash for writing
SPIFlashBeginWrite(MPFS_HEAD);
return 0x00;
#elif defined(MPFS_USE_SD)
// Set FAT pic for writing
MPFSStubs[0].addr = 0;
MPFSStubs[0].fatID = 0xffff;
MPFSStubs[0].bytesRem = MEDIA_BLOCK_SIZE - ( ((BYTE)MPFSStubs[0].addr+MPFS_HEAD) & (MEDIA_BLOCK_SIZE-1) );

return 0x00;
#endif

// Read the data
#if defined(MPFS_USE_EEPROM)
XEEReadArray(MPFSStubs[hMPFS].addr+MPFS_HEAD, cData, wLen);
MPFSStubs[hMPFS].addr += wLen;
MPFSStubs[hMPFS].bytesRem -= wLen;
lastRead = MPFS_INVALID;
#elif defined(MPFS_USE_SPI_FLASH)
SPIFlashReadArray(MPFSStubs[hMPFS].addr+MPFS_HEAD, cData, wLen);
MPFSStubs[hMPFS].addr += wLen;
MPFSStubs[hMPFS].bytesRem -= wLen;
#elif defined(MPFS_USE_SD)
SDWReadArray(MPFSStubs[hMPFS].addr+MPFS_HEAD, cData, wLen);
MPFSStubs[hMPFS].addr += wLen;
MPFSStubs[hMPFS].bytesRem -= wLen;
#else
// Read function for EEPROM
#if defined(MPFS_USE_EEPROM)
// For performance, cache the last read address
if(MPFSStubs[hMPFS].addr != lastRead+1)
    XEEBeginRead(MPFSStubs[hMPFS].addr + MPFS_HEAD);
*c = XEERead();
lastRead = MPFSStubs[hMPFS].addr;
MPFSStubs[hMPFS].addr++;
#elif defined(MPFS_USE_SPI_FLASH)
SPIFlashReadArray(MPFSStubs[hMPFS].addr + MPFS_HEAD,
MPFSStubs[hMPFS].addr++;
#elif defined(MPFS_USE_SD)
SDWReadArray(MPFSStubs[hMPFS].addr + MPFS_HEAD, c, 1);
MPFSStubs[hMPFS].addr++;
#else
```

Figura 5: Exemplos implementações rotinas de acesso ao cartão SD.

As configurações do SPI encontram-se tal como nos outros casos, no ficheiro *HWP OLIMEX\_PIC32-WEB.h*. No ficheiro *SD-SPI.c* as funções de *ReadSPIM*, *WriteSPIM*, *MPP\_SDSPI\_InitIO* entre outras foram alteradas por forma a corresponderem as marcos SPI configuradas.

## IMPORTANTE

De notar que as funções *ReadSPIM* e *WriteSPIM* são diferentes das tradicionais *PutChar* e *GetChar* que se usam para comunicar via SPI, estas representam apenas leitura e escrita simples do/no buffer SPI. As rotinas que garantem a correta receção e envio de bytes de e para o cartão, e que se servem das funções *ReadSPIM* e *SPIM* estão implementadas num nível de abstração diferente e não necessitam de qualquer atenção. Caso por distração, se implemente uma função *ReadSPIM* como uma tradicional *GetChar*, exisitirá redundância de iterações SPI e a comunicação com o cartão SD não funcionará corretamente.

Ao compilar o código no MPLAB, este produz uma série de WARNINGS relativos uso de ponteiros de diversos tipos nas funções *SDWReadArray* e *SDWWriteArray*, esses mesmos WARNINGS são completamente inofensivos pois o código esta perfeitamente habilitado a lidar com esses ponteiros. No



entanto, esse mesmo WRANING pode ser removido no futuro usando ponteiros para *void*, procedendo-se ao *cast* dos mesmos já dentro da função respectiva.

Os endereços específicos para escrita nas diversas zonas do cartão estão definidas no ficheiro *MainDemo.h* e podem ser alterados se necessário.

Antes do uso de um novo cartão, este deve ser formatado em FAT para que as funções da biblioteca *MDD File System* o consigam manipular.

## PLATAFORMA WEB E SERVIDOR

Apesar do servidor HTTP estar já implementado pelas rotinas da *stack* TCP/IP, para que a plataforma WEB fique operacional é ainda necessário muitas modificações e implementações de código.

As funções presentes no ficheiro *CustomHTTPApp.c* garantem a ponte entre a plataforma WEB e o código do microcontrolador, permitindo correr funções escritas em C e invocadas pelo WEBSITE. O ficheiro *HTTPPrint.h* contém *include* de todas essas funções. Existem dois tipo distintos de funções, aquelas que são invocadas pelo servidor HTTP e as que são invocadas pelo código HTML do WEBSITE. Todas as que são representadas por *HTTPPrint\_XXXX* em que XXXX representa o nome da função, são invocadas pela plataforma WEB e encontram-se no código HTML invocadas da forma *~XXXX~* em que XXXX é nome da função e tem que ter correspondente no ficheiro *HTTPPrint.h*. As restantes são invocadas pelo código do servidor HTTP.

De notar que, por forma a manter a consistência do projeto, as funções presentes no ficheiro *CustomHTTPApp.c* só podem recorrer a dados existentes no cartão de memória e nunca à ADC ou a outros quaisquer periféricos. Caso novos parâmetros sejam necessários na plataforma WEB, estes devem de ser previamente armazenados numa zona específica do cartão de memória e só depois carregados para as estruturas das plataforma WEB.

A data atual, que no projeto anterior era obtida lendo diretamente os valores do RTC via I2C, código que era executado pelas funções existentes no ficheiro *CustomHTTPApp.c*, representando assim um erro de consistência de código, são agora obtidos lendo a data dos últimos dados armazenados no cartão de memória. Como os dados são armazenados a cada minuto, comete-se no pior dos casos um erro de um minuto no valor apresentado e elimina-se o moroso processo de comunicação com o RTC via I2C.

Para que o WEBSITE possa ser carregado para o cartão de memória, este tem que ser primeiro compilado para o sistema de ficheiros da microchip, MPFS. Como tal, todos os seus ficheiros e estruturas são convertidas num único ficheiro binário recorrendo a uma aplicação java disponibilizada pela própria microchip. Finalizada a conversão, o ficheiro binário tem que ser carregado para o cartão de memória. Este processo pode ser realizado de duas formas distintas, através do mesmo programa java que a microchip disponibiliza, sendo necessário introduzir o IP, nome da placa entre outras informações que estão disponíveis no ficheiro *TCPIP OLIMEX\_PIC32-WEB.h*, ou então recorrendo ao browser WEB, visto que o servidor HTTP pode também carregar esse mesmo ficheiro, no endereço *@IP/mpfsupload*, sendo que *@IP* representa o IP específico da placa que se usar.

## IMPORTANTE

Para que a plataforma WEB funcione corretamente, é obrigatório que a placa tenha acesso a internet, caso contrario o WEBSITE não vai conseguir carregar as bibliotecas que precisa para correr o código HTML.

Existem diversos comandos *printf* ao longo das funções que fazem a ponte entre o cartão SD e as estruturas do WEBSITE por forma a fazer BEDUG da informação enviada, estes comandos tem que ser comentados pois o seu longo tempo de execução põe em causa a capacidade de resposta do microcontrolador para com o a globalidade do sistema, levando por exemplo a perda de dados nos *buffers* circulares.

# ANEXO B: ESQUEMAS ELÉTRICOS

Variável	Valor
Vref1	5.1 V
Vref2	1.8 V
Vref3	0.5 V
R1	100k $\Omega$
R2	100k $\Omega$
R3	180k $\Omega$
R4	100k $\Omega$
R5	510k $\Omega$
R6	56k $\Omega$
Rpol	680 $\Omega$

Tabela 1: Dimensionamento circuito

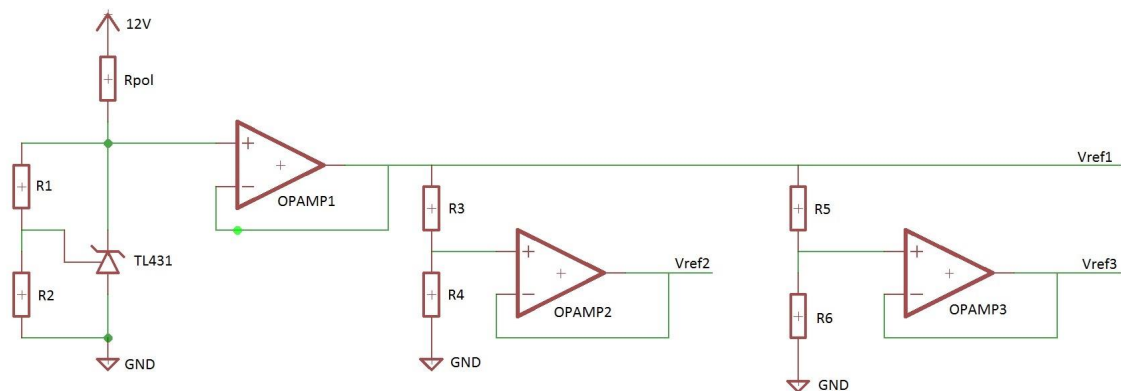


Figura 6: Circuito proposto para geração de todas as tensões de referência do circuito